

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

Departamento de Ingeniería Mecánica



INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL: MECÁNICA

PROYECTO FIN DE CARRERA

***SIMULACIÓN DE ENSAYOS DE
CHOQUE EN VEHÍCULOS.
VALIDACIÓN DE UN MODELO DE
DUMMY EN 2 DIMENSIONES***

AUTOR: JAIME CONDES NOVILLO

DIRECTORA: M^o BELÉN MUÑOZ ABELLA

LEGANÉS, JULIO 2005

Índice

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO	3
1.3 ESTRUCTURA DEL PROYECTO	3
2. NUEVAS TECNOLOGÍAS APLICADAS A LA DOCENCIA.....	5
2.1 INNOVACIÓN TECNOLÓGICA EN LA EDUCACIÓN.....	5
2.2 WORKING MODEL 2D	7
2.2.1 <i>FUNCIONAMIENTO DEL SOFTWARE</i>	8
3. LA SEGURIDAD VIAL.....	11
3.1 INTRODUCCIÓN.....	11
3.2 LA SEGURIDAD DEL AUTOMÓVIL	12
3.2.1 <i>SEGURIDAD ACTIVA</i>	14
3.2.1.1 SISTEMA ANTIBLOQUEO DE FRENADO, A.B.S.....	14
3.2.1.2 SISTEMA ANTIDESLIZAMIENTO DE LA TRACCIÓN, A.S.R.....	16
3.2.1.3 PROGRAMA ELECTRÓNICO DE ESTABILIDAD, E.S.P.	17
3.2.2 <i>SEGURIDAD PASIVA</i>	19
3.2.2.1 CINTURÓN DE SEGURIDAD	19
3.2.2.1.1 Estructura del Cinturón de Seguridad	23
3.2.2.1.2 Lesiones provocadas por el Cinturón de Seguridad	24
3.2.2.1.3 Uso del Cinturón de Seguridad	26
3.2.2.2 AIRBAG	29
3.2.2.2.1 Funcionamiento del Airbag	29
3.2.2.2.2 Tipos de Airbags.....	33
3.2.2.2.3 Eficacia del Airbag	37
3.2.2.2.4 Aspectos a Tener en Cuenta en su Utilización.....	38
3.2.2.3 EL HABITÁCULO DE SEGURIDAD.....	40
3.2.2.3.1 Cómo Actúa la Carrocería Ante una Colisión.....	41
3.2.2.3.2 La Estructura en una Colisión Frontal	43
3.2.2.3.3 Agresividad y Compatibilidad	45
3.2.3 <i>ENSAYOS DE CHOQUE</i>	51
3.2.3.1 QUÉ SON Y PARA QUÉ SIRVEN	51
3.2.3.2 QUIÉN LOS REALIZA.....	51
3.2.3.3 RESISTENCIA DEL CUERPO HUMANO A IMPACTOS Y DECELERACIONES.....	55
3.2.3.4 TIPOS DE CRASH TEST	58
3.2.3.5 EuroNCAP	64
3.2.4 <i>LOS CRASH TEST DUMMIES</i>	69

3.2.4.1 TIPOS DE CRASH TEST DUMMIES	70
3.2.4.1.1 Hybrid III	70
3.2.4.1.2 SID	78
3.2.4.1.3 BioRID	79
3.2.4.1.4 THOR	80
4. SIMULACIÓN DEL ENSAYO MEDIANTE WORKING MODEL 2D.....	81
4.1 OTROS PROGRAMAS DE SIMULACIÓN	81
4.2 METODOLOGÍA.....	83
4.2.1 ELECCIÓN DEL ENSAYO.....	84
4.2.2 INFORMACIÓN DEL DUMMY.....	86
4.2.3 CONSTRUCCIÓN DEL DUMMY	87
4.2.4 CONSTRUCCIÓN DEL ASIENTO O TRINEO	90
4.2.5 DISEÑO DE LA SIMULACIÓN	91
4.2.5.1 PARÁMETROS DE SIMULACIÓN.....	92
4.3 MODELOS PROPUESTOS.....	96
4.3.1 DUMMY MODELO 1	97
4.3.1.1 OBSERVACIONES SOBRE EL DUMMY MODELO 1.....	99
4.3.2 DUMMY MODELO 2	100
4.3.2.1 OBSERVACIONES SOBRE EL DUMMY MODELO 2.....	102
4.3.3 DUMMY MODELO 3	102
4.3.3.1 OBSERVACIONES SOBRE EL DUMMY MODELO 3.....	104
4.4 RESULTADOS Y ELECCIÓN DE LA SIMULACIÓN	106
4.4.1 RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES.....	108
4.4.1.1 MODELO 1	108
4.4.1.2 MODELO 2	110
4.4.1.3 MODELO 3	111
4.5 OPTIMIZACIÓN DE LA SIMULACIÓN	115
4.5.1 PROCESO DE OPTIMIZACIÓN	115
4.5.1.1 PARÁMETROS.....	116
4.5.2 RESULTADOS DEL MODELO OPTIMIZADO.....	118
4.5.3 VALIDACIÓN DEL MODELO.....	119
5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	123
5.1 CONCLUSIONES.....	123
5.2 TRABAJOS FUTUROS.....	124
6. BIBLIOGRAFÍA	125

Índice de figuras

<i>Figura 2.1 – Pantalla principal de Working Model 2D</i>	<i>7</i>
<i>Figura 2.2 – Herramientas y elementos disponibles en Working Model 2D.....</i>	<i>9</i>
<i>Figura 2.3 – Utilización de Working Model 2D en distintas aplicaciones.....</i>	<i>10</i>
<i>Figura 3.1 – Evolución de la fuerza de frenado con respecto al deslizamiento de la rueda.....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 3.2 – Variación de la fuerza de frenado con respecto al deslizamiento de la rueda, ante diferentes condiciones de adherencia del pavimento.....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 3.3 – Círculos de adherencia mostrando diferentes situaciones de frenada combinada con movimiento lateral.....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 3.4 – Maniobra de evasión de un obstáculo con y sin ESP.....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 3.5 – Diagrama del subviraje.....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 3.6 – Diagrama del sobreviraje.....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 3.7 – Movimientos del ocupante durante un choque a 50 km/h</i>	<i>20</i>
<i>Figura 3.8 – Componentes de un cinturón de seguridad actual de tres puntos de anclaje.....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 3.9 – Efecto submarino.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 3.10 – Localización de las lesiones provocadas por el cinturón de seguridad</i>	<i>26</i>
<i>Figura 3.11 – Vehículo dotado de varios airbags.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 3.12 – Secuencia del funcionamiento del airbag durante una colisión.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 3.13 – Ejemplos de airbags frontales hinchados.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 3.14 – Ejemplos de varios sistemas de airbags laterales.</i>	<i>35</i>
<i>Figura 3.15 – Airbag de cabeza.</i>	<i>36</i>
<i>Figura 3.16 – Airbag de otro tipo.</i>	<i>36</i>
<i>Figura3.17 – Conductor fuera de posición.</i>	<i>39</i>
<i>Figura 3.18 – Daños causados por el airbag al conductor fuera de posición.</i>	<i>39</i>
<i>Figura 3.19 – El habitáculo de seguridad, y las otras zonas de la estructura del vehículo.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 3.20 – Estructura de un vehículo.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura3.21 – Colisión frontal.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 3.22 – Vehículos con comportamientos diferentes ante una misma colisión frontal.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 3.23 – Choque entre vehículos de masas diferentes.</i>	<i>46</i>
<i>Figura 3.24 – Colisión frontal entre dos vehículos idénticos.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 3.25 – Vehículos con buena compatibilidad.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 3.26 – Vehículo con mala compatibilidad.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 3.27 –Incompatibilidad estructural entre vehículos.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 3.28 – Pruebas de choque realizadas por Volvo a sus modelos.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 3.29 – Esquema del ensayo frontal europeo.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 3.30 – Norma de referencia en el ensayo de lesión del cuello</i>	<i>63</i>
<i>Figura 3.31 – Norma de referencia en el ensayo de fuerza del fémur</i>	<i>63</i>

<i>Figura 3.32 – Ensayo frontal EuroNCAP</i>	<i>66</i>
<i>Figura 3.33 – Ensayo lateral EuroNCAP.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 3.34 – Esquema del ensayo lateral de poste EuroNCAP.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 3.35 – Ensayo lateral de poste EuroNCAP</i>	<i>68</i>
<i>Figura 3.36 – Dummy “Sam”, de la empresa Sierra Engineering</i>	<i>70</i>
<i>Figura 3.37 – Fisionomía del Hybrid III.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 3.38 – Hybrid III masculino, percentil 50%.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 3.39 – Hybrid III masculino, percentil 95%.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 3.40 – Hybrid III femenino, percentil 5%.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 3.41 – Hybrid III infantil, 3 años.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 3.42 – Hybrid III infantil, 6 años.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 3.43 – Hybrid III infantil, 10 años.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 3.44 – SID (Side Impact Dummy).....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 3.45 – BioRID.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 3.46 – THOR, Test device for Human Occupant Restraint</i>	<i>80</i>
<i>Figura 4.1 – Modelo realizado con PAM-SAFE</i>	<i>81</i>
<i>Figura 4.2 – Ensayos realizados por TNO con MADYMO.</i>	<i>82</i>
<i>Figura 4.3 – Modelo de elementos finitos realizado por FTSS con LS-DYNA.....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 4.4 – Modelo de elementos finitos realizado por ARA con LS-DYNA</i>	<i>82</i>
<i>Figura 4.5 – Modelos realizados por CIDAUT.....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 4.6 – Modelo multicuerpo incluido en el proyecto ADRIA.....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 4.7 – Modelo desarrollado por ARA, elaborado con LS-DYNA.....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 4.8 – Aceleración aplicada en el ensayo realizado por ARA ..</i>	<i>85</i>
<i>Figura 4.9 – Comportamiento del dummy durante el ensayo realizado por ARA.....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 4.10 – Dimensiones externas del dummy Hybrid III, de percentil 50%</i>	<i>86</i>
<i>Figura 4.11 – Proceso de trazado del dummy en AutoCAD</i>	<i>88</i>
<i>Figura 4.12 – Modelo desarrollado por ARA, elaborado con LS-DYNA.....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 4.13 – Modelo de trineo empleado en el modelo.....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 4.14 – Aceleración aplicada en el ensayo realizado por ARA, el ensayo de referencia.....</i>	<i>93</i>
<i>Figura 4.15 – Comparación del pulso de aceleración tomado manualmente, con el pulso original.....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 4.16 – Comparación del pulso de aceleración empleado en el modelo, con el pulso original</i>	<i>94</i>
<i>Figura 4.17 – Elementos componentes del ensayo.....</i>	<i>95</i>
<i>Figura 4.18 – Hybrid III modificado por la FAA, empleado como referencia para construir el Dummy Modelo 1.....</i>	<i>97</i>
<i>Figura 4.19 – Dimensiones externas del Dummy Modelo 1.....</i>	<i>98</i>
<i>Figura 4.20 – Dummy Modelo 1 construido en formato WM2D.....</i>	<i>99</i>
<i>Figura 4.21 – Hybrid III frente al FAA Hybrid III.....</i>	<i>100</i>
<i>Figura 4.22 – Dimensiones externas del Dummy Modelo 2.....</i>	<i>101</i>
<i>Figura 4.23 – Dummy Modelo 2 construido en formato WM2D.....</i>	<i>101</i>
<i>Figura 4.24 – Hybrid III empleado como referencia para construir el Dummy Modelo 1</i>	<i>102</i>

<i>Figura 4.25 – Dimensiones externas del Dummy Modelo 3.....</i>	<i>103</i>
<i>Figura 4.26 – Dummy Modelo 3 construido en formato WM2D.....</i>	<i>103</i>
<i>Figura 4.27 – Detalle del FAA Hybrid III.....</i>	<i>104</i>
<i>Figura 4.28 – Superposición de los tres modelos construidos.....</i>	<i>105</i>
<i>Figura 4.29 – Parámetros de precisión.....</i>	<i>107</i>
<i>Figura 4.30 – Modelo 1 Clavija.....</i>	<i>108</i>
<i>Figura 4.31 – Modelo 1 Muelle.....</i>	<i>109</i>
<i>Figura 4.32 – Modelo 1 Amortiguador.....</i>	<i>109</i>
<i>Figura 4.33 – Modelo 2 Clavija.....</i>	<i>110</i>
<i>Figura 4.34 – Modelo 2 Muelle.....</i>	<i>110</i>
<i>Figura 4.35 – Modelo 2 Amortiguador.....</i>	<i>111</i>
<i>Figura 4.36 – Modelo 3 Clavija.....</i>	<i>111</i>
<i>Figura 4.37 – Modelo 3 Muelle.....</i>	<i>112</i>
<i>Figura 4.38 – Modelo 3 Amortiguador.....</i>	<i>112</i>
<i>Figura 4.39 – Comportamiento del dummy durante el ensayo realizado por ARA.....</i>	<i>113</i>
<i>Figura 4.40 – Proceso de optimización.....</i>	<i>116</i>
<i>Figura 4.41 – Curvas de aceleración del modelo optimizado.....</i>	<i>118</i>
<i>Figura 4.42 – Secuencia del ensayo con el modelo optimizado.....</i>	<i>119</i>
<i>Figura 4.43 – Comparación de la respuesta obtenida con el modelo optimizado, con las respuestas del Hybrid III real y el modelo de ARA.....</i>	<i>120</i>
<i>Figura 4.44 – Indicación de los aspectos diferentes en la aceleración de la cabeza del modelo optimizado.....</i>	<i>121</i>
<i>Figura 4.45 – Indicación de los aspectos diferentes en la aceleración del pecho del modelo optimizado.....</i>	<i>121</i>

Índice de Tablas

<i>Tabla 3.1 – Uso del cinturón de seguridad según el tipo de vía.</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 3.2 – Sensores empleados en el Hybrid III.....</i>	<i>77</i>
<i>Tabla 4.1 – Masas del modelo de dummy</i>	<i>92</i>

1. INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia del automóvil, desde que apareció el primer vehículo, se han ido produciendo constantes avances en todos los aspectos relacionados con el mismo, tales como prestaciones, diseño, confort, proceso de fabricación o seguridad.

Actualmente, unas de las herramientas fundamentales para conseguir estas mejoras son el CAD (Computer Aided Design) y CAE (Computer Aided Engineering). Tal y como conocemos hoy en día un automóvil, no sería posible sin la existencia de la informática aplicada en la industria. En todo el proceso, desde que se toma la decisión de crear un nuevo modelo de automóvil hasta que éste es vendido, la informática es imprescindible. Estos programas son utilizados como herramienta de apoyo para los ingenieros de la industria del automóvil, ya que facilitan su tarea en todas las facetas del diseño.

En el diseño del automóvil, los programas informáticos y en especial los de simulación, han mejorado sobre todo el proceso dedicado a la experimentación. Cuando no se disponía de esta herramienta, los fabricantes debían construir prototipos de cada elemento que se quería probar, incluyendo vehículos completos. Si una vez contruidos y ensayados los prototipos, no cumplían con los requisitos establecidos, era necesario realizar todo el proceso nuevamente. Cada vez que se realizaba esto, suponía un gran gasto económico y de tiempo. Los programas informáticos de simulación posibilitan una gran reducción en los costes de construcción de los prototipos, ya que son necesarios un menor número al conocerse de forma anticipada el comportamiento del automóvil. De este modo, hasta que en la simulación no se consiguen los resultados óptimos, no se procede a la construcción de un prototipo de verificación.

En concreto, en el campo de la seguridad, la simulación ha llevado a conseguir un mayor y rápido avance. Se emplea para desarrollar mejores estructuras de los vehículos, porque es posible comprobar fácilmente su comportamiento ante diferentes situaciones, como en el caso de las colisiones. De esta forma, también el número de pruebas de choque con los vehículos pueden reducirse.

Uno de los últimos elementos que han sido simulados, mediante computador, han sido los maniquíes de pruebas de choque, o “crash test dummies”. Empleando modelos, desarrollados a partir de los datos recogidos de los dummies reales, se han podido simular crash test totalmente completos, lo que ha permitido conocer tanto el comportamiento del propio vehículo como el de sus ocupantes, sin necesidad de realizar, en las primeras fases del diseño, ninguna prueba real. Además, también han permitido optimizar los distintos sistemas de seguridad pasiva existentes en el automóvil, como son el cinturón de seguridad o el airbag. Mediante estos nuevos modelos de dummies, los investigadores pueden elegir los ensayos más significativos, de los cuales obtener datos importantes, sin la necesidad de realizar varias pruebas hasta encontrar la configuración adecuada del ensayo.

Una de estas pruebas, es el ensayo de sistemas de retención. El ensayo tipo consiste en un asiento sobre el que se sitúa un dummy de prueba, el cual se sujeta mediante el cinturón de seguridad. Posteriormente, sobre el asiento se aplica una cierta aceleración, que reproduce las condiciones en las cuales los sistemas de retención actúan normalmente, es decir, colisiones y frenadas bruscas. Mediante esta prueba se pueden valorar tanto el funcionamiento del sistema de retención, como la interacción con el ocupante y sus posibles daños.

Dentro del mencionado campo de la simulación de ensayos de choque, en este proyecto, se ha reproducido uno de estos ensayos sobre asiento, desarrollando todos los elementos necesarios, como son el modelo de dummy y el propio experimento o ensayo. Para su realización, se ha empleado un programa comercial de simulación de mecanismos y elementos mecánicos en dos dimensiones, Working Model 2D.

1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO

El objetivo principal del presente proyecto es realizar un modelo de simulación, mediante el programa de simulación en dos dimensiones Working Model 2D, de los ensayos de vehículos automóviles para la evaluación de la respuesta del cuerpo humano y el funcionamiento de los sistemas de retención, durante una colisión o frenada brusca.

Para alcanzar el objetivo principal, el proyecto debe alcanzar una serie de objetivos secundarios.

- ◆ Realizar una revisión de los sistemas de seguridad pasiva del automóvil y de su relación con los actuales ensayos de choque.
- ◆ Evaluar las posibilidades de un programa de simulación de mecanismos en dos dimensiones para simular ensayos de choque.
- ◆ Comparar las diferentes herramientas que proporciona Working Model 2D, para conseguir el resultado óptimo en la simulación.
- ◆ Desarrollar una herramienta docente, que permita a los alumnos estudiar el diferente comportamiento del cuerpo humano cuando se varían las condiciones de ensayo del vehículo.

1.3 ESTRUCTURA DEL PROYECTO

El proyecto está estructurado en diversos capítulos que son descritos a continuación:

En el Capítulo 1 se hace una breve introducción del proyecto, donde se explican los antecedentes que han llevado a su realización. También se detallan los objetivos planteados en el mismo.

En el Capítulo 2, se explican las claves de la importancia, cada vez mayor, de la aplicación de las nuevas tecnologías de la información a la simulación y la docencia. Seguidamente, se incluye una pequeña descripción del software empleado en este proyecto, Working Model 2D.

En el Capítulo 3 se describen diferentes elementos de seguridad vial, tanto sistemas de seguridad activa, como pasiva. Se hace un mayor hincapié en esta última, ya que es uno de los principales objetivos del presente proyecto.

En el siguiente Capítulo, el 4, se explica todo el proceso llevado a cabo para la realización de la simulación, núcleo principal del proyecto. Se describe la metodología empleada para elaborar la simulación, así como los resultados obtenidos y las conclusiones extraídas.

En el Capítulo 5, se expresan las conclusiones generales obtenidas de la realización del proyecto junto con los posibles trabajos futuros propuestos.

Por último, el Capítulo 6, muestra la bibliografía consultada durante la realización del trabajo.

2. NUEVAS TECNOLOGÍAS APLICADAS A LA DOCENCIA

2.1 INNOVACIÓN TECNOLÓGICA EN LA EDUCACIÓN

Cada vez es más común hoy en día la incorporación de medios informáticos y audiovisuales a la docencia de enseñanzas técnicas. Además, estas herramientas expositivas y didácticas se ven sometidas a continuas revisiones que hacen necesaria la creación de nuevas aplicaciones informáticas que respondan a las necesidades que van surgiendo. Los principales motivos de esta tendencia son, por una parte, crear un entorno más atractivo para el alumno, que facilite su aprendizaje y, por otra, ayudar al profesor en su tarea de enseñanza.

Sin embargo, no cabe entender el papel de las nuevas tecnologías como eje de una “transformación del sistema educativo”. Por ejemplo, Internet y todas las nuevas tecnologías asociadas han supuesto una revolución en todos los campos, sociales, económicos, políticos. La Red es una herramienta que elimina las barreras geográficas, culturales e incluso temporales, es un motor de la globalización y una gran biblioteca capaz de contener gran parte del saber humano, pero también estas tecnologías han venido a fomentar una brecha no sólo entre países desarrollados y subdesarrollados sino también entre generaciones, debilitando los pilares de una educación global.

Por el contrario, muchos aspectos positivos justifican la inclusión de las nuevas tecnologías a la enseñanza [1]:

- ♦ La necesidad de dar respuesta a las demandas de una sociedad tecnológica, dado que los centros docentes forman parte de la estructura social, ello obliga a integrar los avances tecnológicos que la sociedad genera. El desconocimiento de esta materia supone cerrar los ojos a la realidad. Se enseña para formar a la sociedad, por lo que también se tiene que enseñar un uso correcto de los nuevos recursos.

- ◆ La modernización de la enseñanza. El desarrollo de las nuevas tecnologías permite tomar conciencia de los problemas que giran en torno a los avances científicos y capacita para hacer uso de las herramientas tecnológicas, y enseñar y aprender de una forma mucho más eficiente.
- ◆ Mejorar los procesos educativos y por tanto la calidad de la enseñanza, ya que el uso de los medios facilita la mejor captación de la información y tiene un gran poder de seducción.
- ◆ Generar un modelo educativo distinto y acorde con las necesidades del momento, como alternativa al modelo clásico o tradicional en el que se ha venido asentando la enseñanza.
- ◆ Actualización en la formación del cuerpo docente. Fomentar la capacitación tecnológica de los futuros docentes se convierte en algo ineludible.

La utilización de las nuevas tecnologías se está convirtiendo hoy en día en un instrumento que mejora la calidad de la relación docente entre profesores y alumnos, ventaja principal que hay que destacar, además de otras ventajas:

- ◆ Conexión con la sociedad y sus demandas, tienen utilidad para la vida social.
- ◆ Actualización, nuevos modos de enseñar y aprender.
- ◆ Aplicación práctica: posibilidad de manipular, instrumentos de apoyo en la comunicación educativa, facilitan la labor del docente, mayor refuerzo en el aprendizaje con ayuda de la imagen, que ayuda a la comprensión de conceptos.
- ◆ Función motivadora, captan con mayor facilidad la atención de los alumnos.
- ◆ El empleo de imágenes acerca a la realidad y hace que el aprendizaje sea más eficaz. Dispone todos los sentidos para la recepción de información, facilita el acceso a la información, permite una información más ágil.

- ♦ Aumenta la participación e interacción, hace más flexible el agrupamiento de los alumnos.
- ♦ Promueve la creatividad tanto de alumnos como de profesores a la hora de abordar un problema, potencia la imaginación y la investigación, así como una mayor autonomía en los alumnos.
- ♦ Cambia significativamente el papel del profesor que pasa de la mera transmisión de la información a ser quién facilite los procesos de enseñanza-aprendizaje.

2.2 WORKING MODEL 2D

La simulación objetivo del presente Proyecto ha sido realizada con el software comercial *Working Model 2D*. Este programa es un paquete de simulación mecánica que permite analizar rápidamente sistemas bidimensionales en PC's, que ofrece posibilidad de aplicar las leyes de la mecánica sobre un diseño virtual antes de construir prototipos. En la *figura 2.1* se muestra la pantalla principal del programa.

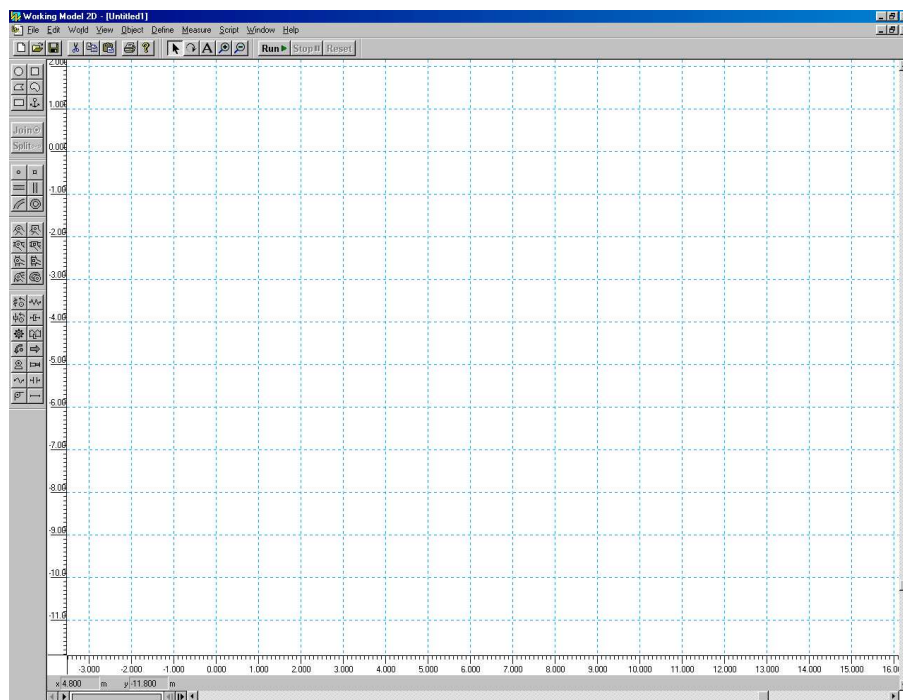


Figura 2.1 – Pantalla principal de Working Model 2D

2.2.1 FUNCIONAMIENTO DEL SOFTWARE

La creación de simulaciones mediante Working Model 2D se puede dividir en los pasos que se describen a continuación:

- ◆ Dibujo de las piezas o mecanismos que se quieren simular. El dibujo se puede realizar en la pantalla del ordenador con el ratón, tal como se haría con cualquier programa de dibujo o pintura, o bien, es posible importar la geometría de los sistemas de CAD más conocidos. Los tipos de cuerpos disponibles son: círculos, rectángulos, polígonos y cuerpos suaves (b-Spline).
- ◆ Definición de características físicas para los cuerpos dibujados. Las propiedades más importantes que se pueden definir son masa, densidad, geometría, centro de masa, momento de inercia, velocidad, velocidad angular y carga electrostática. Por otra parte, Working Model 2D también permite hacer el seguimiento de la trayectoria del movimiento de los cuerpos, predecir la detección y respuesta automática de colisiones entre los mismos y la aplicación automática de fricción estática y dinámica.
- ◆ Definición de las restricciones entre los diferentes cuerpos. Las más importantes son:
 - Articulaciones con ranura, clavijas, rígidas, curvas y con cerrojo
 - Barras, sogas, poleas y engranajes
 - Resortes y amortiguadores lineales y rotatorios
- ◆ Definición de los generadores de movimiento, entre ellos:
 - Motores
 - Actuadores
 - Fuerzas
 - Momentos

Además, las restricciones y los generadores de movimiento pueden ser definidos numéricamente o por ecuaciones en el editor de fórmulas o con datos en tablas.

- ◆ Definición de los parámetros de simulación: Intervalos de integración y configuración de las tolerancias.

En la *figura 2.2* se puede ver las herramientas ofrecidas por Working Model 2D, mencionadas anteriormente.



Figura 2.2 – Herramientas y elementos disponibles en Working Model 2D

Los resultados que ofrece el programa son de dos tipos, visuales y numéricos. En el primer caso, es posible realizar un vídeo de la simulación realizada, y en el segundo caso, se pueden obtener valores numéricos de diferentes parámetros, tales como:

- Posición
- Velocidad
- Aceleración
- Momento
- Momento angular
- Fuerza
- Gravedad, electrostática y fuerza del aire
- Energía cinética, potencial gravitatorio

Working Model 2D permite trabajar en diferentes sectores de la industria. En la siguiente figura pueden verse diversas aplicaciones: diseño de bicicletas, diseño de maquinaria, reconstrucción de accidentes de tráfico y estudios de estructuras sismorresistentes.

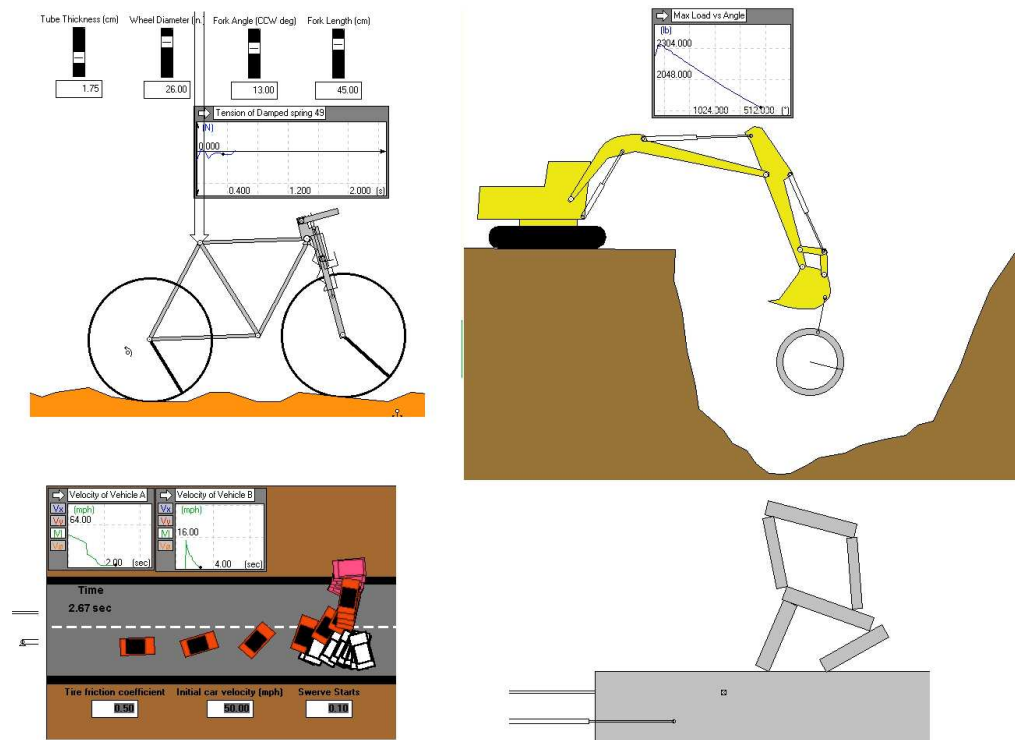


Figura 2.3 – Utilización de Working Model 2D en distintas aplicaciones

3. LA SEGURIDAD VIAL

3.1 INTRODUCCIÓN

La seguridad en el automóvil, o mejor dicho inseguridad, es un asunto de plena vigencia actualmente. Miles de personas, cada día, se ven afectadas por los accidentes de tráfico en todo el mundo. Aunque pueda parecer que esta situación es debida únicamente a una sociedad global en constante crecimiento y desarrollo, lo cierto es que los accidentes de tráfico han estado estrechamente vinculados a los automóviles desde el comienzo de su historia. Cuando aún el concepto de automóvil ni siquiera existía, y lo único conocido eran unos inventos que la gente construía en sus propias casas y que usaban como una simple distracción, ya comenzaron a producirse los primeros afectados relacionados con los accidentes de tráfico. La primer víctima de un accidente se produjo el 17 de agosto de 1896, fue Bridget Driscoll, que fue arrollado por uno de los primeros automóviles [2].

Estos hechos se han repetido una y otra vez hasta llegar a nuestros días. Según datos de la OMS (Organización Mundial de la Salud), diariamente en todo el mundo se ven afectadas por accidentes de tráfico unas 140.000 personas, de las cuales más de 3.000 mueren y otras 15.000 quedan discapacitadas de por vida. La OMS estima que si esta tendencia continúa, en el año 2020 las cifras de afectados por los accidentes de tráfico pueden aumentar en un 60% [2].

Por supuesto, en España la situación no es diferente a la de cualquier otro país con un gran número de vehículos y conductores. Según las estadísticas de los últimos 25 años, incluyendo el pasado año 2004, en las carreteras españolas han muerto una media de 4.500 personas al año. Es decir, a lo largo de estos 25 años de estadística, existe una media de más de 12 muertos diarios en accidentes de tráfico [3]. Aunque estas cifras son muy llamativas, lo cierto es que serían mucho más elevadas de no ser por todas las medidas de seguridad tomadas en el sector del automóvil para reducirlas.

3.2 LA SEGURIDAD DEL AUTOMÓVIL

Según el glosario del RACE (Real Automóvil Club de España), la seguridad se puede definir como [4]:

Referido al automóvil, la seguridad atañe a cualquier medida que se toma para evitar que se produzca un accidente, o minimizar los daños para sus ocupantes en caso de que llegue a producirse.

Estas medidas tomadas para evitar un accidente o minimizar sus efectos, pueden ser de varios tipos. Pueden ser medidas administrativas como leyes y sanciones; medidas de concienciación e información como son las campañas publicitarias y estudios estadísticos; medidas técnicas como son las que poseen los vehículos o las de mejora de las carreteras. Pero tal vez las más importantes de todas, sean las medidas tomadas por los propios conductores, ya que en muchas ocasiones el responsable final de la seguridad en el automóvil, es el conductor. Aparte de estas medidas, cualquier otra, sea de la clase que sea, también debe tenerse en cuenta siempre y cuando esté incluida en la definición de seguridad.

Cuando se circula con un vehículo, en cualquier situación, intervienen tres elementos o factores, y su relación es la que crea las circunstancias para que se produzca un posible accidente de tráfico. Estos factores son, la **vía** por la que se circula y su condición, el **vehículo** y el **conductor**. A la vez, estos dos últimos elementos influyen en las condiciones de la vía, pudiendo afectar a otros vehículos y conductores, y como consecuencia crearse las condiciones para que ocurra un accidente.

De estos tres factores mencionados, se sabe que el principal responsable tanto de que ocurra un accidente como de evitarlo, es el conductor. Para que el conductor pueda evitar un accidente, cuando aparece una situación peligrosa, es necesario contar con un vehículo que ayude a solventar esa situación. Aunque en algunos casos el accidente puede ser producido por un fallo del vehículo, lo cierto es que, según los datos del último año[3], tan sólo en el 0,92% de los accidentes mortales en las carreteras españolas, fueron causados por un fallo mecánico. Por esto, hay que considerar al vehículo como nuestro gran aliado a la hora de afrontar una situación de riesgo o un accidente, y no como el responsable de los accidentes.

Todo automóvil, independientemente del tipo, clase o precio que sea, dispone de varios elementos cuya función principal es la de ofrecer seguridad. Esta seguridad se puede clasificar según su función específica en dos clases. Por un lado están las medidas de **seguridad activa**, y por otro, están las medidas de **seguridad pasiva**.

Estos dos tipos de seguridad se puede definir como [4]:

- ◆ **Seguridad Activa.** Comprende todos los dispositivos o mecanismos dedicados a evitar que se llegue a producir el accidente, como puede ser el ABS, controles de estabilidad o tracción, suspensiones, etc.
- ◆ **Seguridad Pasiva.** Se refiere a los elementos que minimizan los efectos de un accidente, como los airbag, cinturones de seguridad, estructuras de deformación programada, etc.

La diferencia entre ambos tipos de seguridad, presentes en todo automóvil, es el momento en el que entran en acción. Los sistemas de seguridad activa están constantemente funcionando, activos, mientras que los sistemas de seguridad pasiva sólo entran en funcionamiento cuando se produce o se va a producir un accidente. Siempre que la seguridad pasiva actúa, es porque la seguridad activa no ha sido capaz de evitar el accidente, bien, porque los elementos de seguridad activa no han tenido la capacidad necesaria para evitar el accidente o porque simplemente el conductor no ha utilizado, o ha utilizado mal estos elementos.

3.2.1 SEGURIDAD ACTIVA

Forman parte de la seguridad activa todos los elementos cuyo fin es evitar que se produzca un accidente. El concepto “*evitar que se produzca un accidente*” es muy general y, por tanto, en él es posible incluir muchos elementos o sistemas que todo automóvil debe poseer, tales como los neumáticos, frenos, suspensión, dirección, alumbrado y otros. Estos son necesarios, puesto que si algún sistema falla o no existiese, el accidente estaría prácticamente garantizado. Sin embargo, existen otros sistemas que fueron ideados exclusivamente para mejorar la seguridad del automóvil y son los que comúnmente se relacionan con la seguridad activa. Los más utilizados actualmente son tres:

- ◆ Sistema Antibloqueo de Frenado, ABS
- ◆ Sistema Antideslizamiento de la Tracción, ASR
- ◆ Programa Electrónico de Estabilidad, ESP

3.2.1.1 SISTEMA ANTIBLOQUEO DE FRENADO, A.B.S.

La denominación del Sistema Antibloqueo de Frenado, ABS es la abreviatura que corresponde a las voces inglesas, “**Anti-Lock Braking System**”. Su función es la de impedir el bloqueo de las ruedas durante una frenada. Una rueda se bloquea al frenar, porque la fuerza de frenado generada entre el neumático y el pavimento supera la adherencia disponible en ese instante. Es entonces cuando se produce el patinamiento de la rueda, que concluye con el rápido bloqueo de la misma, provocando una posible pérdida de control del vehículo.

En las *figuras 3.1 y 3.2* puede verse la evolución de la fuerza de frenado con respecto al deslizamiento, hasta que se llega al bloqueo de la rueda. Cuando se supera la zona estable se producirá el bloqueo la rueda, dejando ésta de girar aunque se frene con mayor fuerza [5].

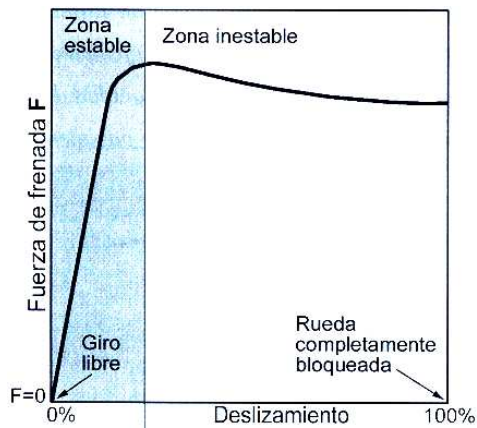


Figura 3.1 – Evolución de la fuerza de frenado con respecto al deslizamiento de la rueda. El punto del 100% de deslizamiento corresponde con el bloqueo de la rueda.



Figura 3.2 – Variación de la fuerza de frenado con respecto al deslizamiento de la rueda, ante diferentes condiciones de adherencia del pavimento.

Cuando en una frenada se ha superado la adherencia disponible en ese momento, provocando el bloqueo de la rueda, se elimina toda capacidad de dirección del vehículo. Esto es debido a que el neumático no es capaz de transmitir fuerza transversal o lateral alguna, que es la que provoca el cambio de trayectoria del vehículo, ya que toda la adherencia existente es empleada completamente por la fuerza de frenado. Este aspecto se representa gráficamente en la siguiente figura.

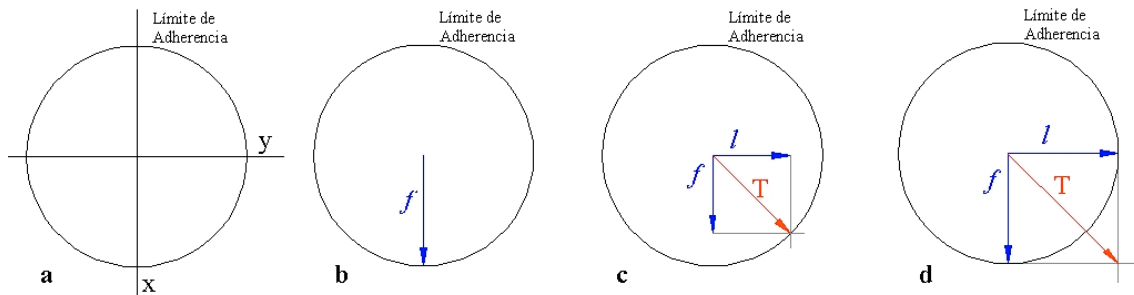


Figura 3.3 – Círculos de adherencia mostrando diferentes situaciones de frenada combinada con movimiento lateral.

En la *figura 3.3a*, se representa mediante un círculo la adherencia disponible en un instante cualquiera. Los ejes x e y , muestran la dirección longitudinal del vehículo donde aparecerá la fuerza de frenado, f , y la dirección transversal del vehículo donde aparecerá la fuerza lateral, l , respectivamente. Cualquier combinación de fuerzas, cuya resultante sobrepase la circunferencia o límite de adherencia, provocará el bloqueo de la rueda. En la *figura 3.3b*, puede verse una supuesta situación de frenada en la cual, la fuerza f , o fuerza de frenado, ha alcanzado el límite de adherencia y por tanto no es posible la transmisión de ningún tipo de fuerza lateral. Es decir, si esta circunstancia

se diese en las ruedas delanteras de un vehículo, éste perdería la capacidad de dirección. En la *figura 3.3c* aparece una combinación de fuerzas que permite frenar la rueda, a la vez que permite el cambio de trayectoria de la misma. Esta figura también puede representar una frenada cuando se está trazando una curva. En ambos casos no se produciría la pérdida de control del vehículo provocada por el bloqueo de la rueda. En la *figura 3.3d* se muestran tanto la fuerza de frenado máxima como la fuerza lateral máxima posible, y como su combinación generará una fuerza que supera ampliamente la adherencia disponible.

El Sistema Antibloqueo de Frenado o ABS, tiene la capacidad de controlar independientemente cada rueda del vehículo consiguiendo realizar la mejor frenada posible en cada momento, evitando cualquier bloqueo de las ruedas que pueden provocar la pérdida del control del vehículo. El ABS permite frenar con una fuerza cercana al valor pico de la curva fuerza-deslizamiento, evitando el patinamiento y bloqueo de la rueda. Es decir, el ABS consigue frenar las ruedas de forma que no se sobrepase el límite de adherencia mostrado en los anteriores círculos. Durante una frenada de emergencia es donde el ABS muestra su gran potencial, ya que permite frenar “a fondo” a la vez que se mantiene la capacidad de dirección, de forma que permite esquivar el obstáculo contra el que se podría colisionar.

3.2.1.2 SISTEMA ANTIDESLIZAMIENTO DE LA TRACCIÓN, A.S.R.

El Sistema Antideslizamiento de la Tracción o Regulación Antideslizamiento, A.S.R. proviene de la denominación en inglés, **Anti Slip Regulation**. También es conocido como Control de Tracción o TCS [5].

Si el sistema ABS impedía que las ruedas se bloqueasen al frenar, la función del sistema antideslizamiento de la tracción, ASR, es impedir el deslizamiento de las ruedas motrices al acelerar.

El deslizamiento o patinamiento de las ruedas al traccionar se produce, como ocurre cuando se frena, porque la fuerza de tracción supera la adherencia disponible entre el neumático y el pavimento.

Con el ASR se aumenta la seguridad, ya que se mejora la manejabilidad y la estabilidad del vehículo cuando el vehículo intenta traccionar sobre pavimentos con baja adherencia, debida al tipo de firme o a las condiciones ambientales. Momentos como la arrancada e incluso la simple circulación por firmes de nieve o grava, son mejorados por el ASR.

3.2.1.3 PROGRAMA ELECTRÓNICO DE ESTABILIDAD, E.S.P.

El ESP, “**E**lectronic **S**tability **P**rogramm”, es el sistema de seguridad activa más complejo de los tres citados. Su finalidad y funcionamiento están muy relacionados con los anteriores sistemas. Tanto el ABS como el ASR, impiden el deslizamiento de las ruedas en sentido longitudinal del vehículo de forma que se mantiene manejable, pero no ayudan a mantenerlo estable y en equilibrio. El ESP consigue evitar el deslizamiento transversal del vehículo, evitando que el conductor pierda el control del vehículo, manteniéndolo estable y equilibrado de forma que siga la trayectoria deseada. Esta pérdida de control se suele dar cuando aparecen sobre el vehículo fuerzas laterales, es decir, cuando se toma una curva o se cambia bruscamente de trayectoria [5].

Para evitar a tiempo la pérdida de estabilidad y por tanto la pérdida del control del vehículo, el ESP está permanentemente trabajando. En este aspecto el ESP es diferente al ABS y al ASR, ya que estos sistemas sólo actúan en dos circunstancias muy puntuales, ante una frenada o ante una aceleración. Sin embargo, una pérdida de control o inestabilidad del vehículo puede ocurrir en cualquier circunstancia y en cualquier momento, siempre que aparezcan fuerzas laterales.

El ESP se ha comprobado que es de gran utilidad ante una de las situaciones más comprometidas para la estabilidad del vehículo, que es la maniobra de evasión de un obstáculo a alta velocidad, representada en la *figura 3.4*. Ante un cambio en las condiciones del firme puede ayudar también a mantener controlado el vehículo [6].

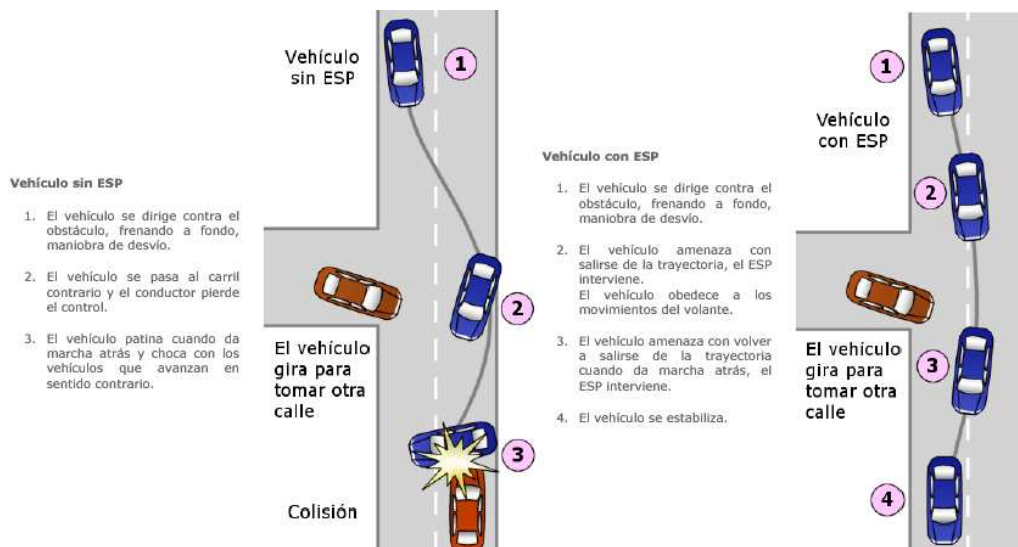


Figura 3.4 – Maniobra de evasión de un obstáculo con y sin ESP

La pérdida de control de un automóvil suele darse en dos formas distintas: **subviraje** y **sobreviraje** [6] y [7].

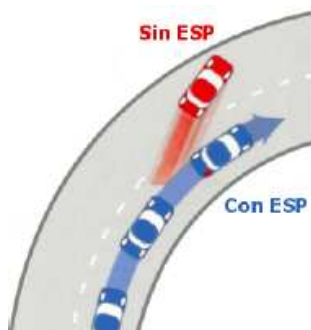


Figura 3.5 – Diagrama del subviraje

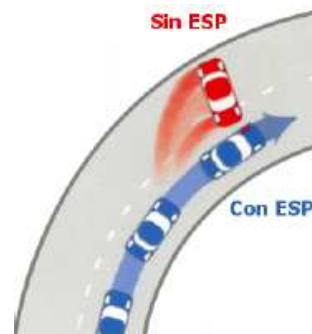


Figura 3.6 – Diagrama del sobreviraje

El **Subviraje**, mostrado en la *figura 3.5*, se produce cuando un vehículo al intentar trazar una curva, su tren delantero patina haciendo que el vehículo siga una trayectoria recta y no tome la curva. Para evitar el subviraje, el ESP reacciona frenando inmediatamente la rueda trasera en el interior de la curva. El **sobreviraje**, mostrado en la *figura 3.6*, se produce cuando un vehículo al trazar una curva su parte trasera es la que patina produciéndose un derrape, que puede acabar en un llamado "trompo". Para evitar el sobreviraje, el ESP reacciona frenando inmediatamente la rueda delantera del exterior de la curva.

3.2.2 SEGURIDAD PASIVA

Todos los elementos incluidos en los sistemas de seguridad pasiva tienen una única función, que es la de minimizar los efectos de un accidente para el ocupante.

Aunque existen otras medidas de seguridad pasiva, se expondrán a continuación las más importantes, representativas y que están directamente relacionadas con la temática del proyecto:

- ◆ Cinturón de Seguridad
- ◆ Airbag
- ◆ Habitáculo de Seguridad

3.2.2.1 CINTURÓN DE SEGURIDAD

El cinturón de seguridad ha sido, y es, el dispositivo de retención por excelencia. Su introducción en el mundo del automóvil se remonta a hace más de 45 años, proveniente de la aviación, lo que significa que es la medida de seguridad pasiva con más edad. A pesar de esto, sigue siendo la forma más eficaz y sencilla de reducir el número y la gravedad de las lesiones producidas en los accidentes de tráfico. A lo largo de estos años ha sufrido modificaciones, aprovechando las mejoras tecnológicas, haciendo que su protección sea cada vez mejor. Aunque los cinturones de seguridad actuales han surgido tras muchos años de investigación, el concepto es similar al de los primeros [8][9].

La principal función del cinturón de seguridad es retener al ocupante, es decir, mantenerlo en su asiento, impidiendo que se produzcan movimientos bruscos, incontrolados o involuntarios en cualquier situación.

En un accidente de tráfico se producen tres colisiones distintas. La primera de ellas es la propia colisión que se produce entre el vehículo y el objeto contra el que choca. Esta colisión es la más importante de todas y es la que origina las otras dos, aunque por otro lado la afectación final de los ocupantes del vehículo no está únicamente relacionada con la intensidad de esta colisión. La segunda colisión es la que se ocasiona cuando el cuerpo del ocupante impacta con algún objeto del interior del vehículo o con cualquier otro elemento. La tercera colisión, consecuencia de la

segunda, consiste en el choque entre sí de los órganos internos del ocupante o contra los huesos.

El objetivo de cualquier elemento de retención, como lo es el cinturón de seguridad, es evitar o reducir al máximo la segunda colisión, una vez que se ha producido la primera, y como resultado también se reducirá la tercera colisión.

Si, por ejemplo, vamos en el interior de un automóvil que circula a 50 km/h, sin ir sujetos por el cinturón de seguridad y chocamos contra una barrera fija, nuestro cuerpo seguirá viajando prácticamente a la misma velocidad que llevaba el vehículo hasta impactar contra alguna parte del interior del automóvil. Este choque sería similar al producido al caer al suelo si nos tirásemos desde un tercer piso. La secuencia del accidente del conductor, sin usar cinturón de seguridad, puede explicarse de la siguiente forma y puede observarse en la *figura 3.7* [8]:

Desde que se inicia el choque hasta que el vehículo se detiene, transcurren aproximadamente 90 milésimas de segundo, comprimiéndose el frontal unos 60 cm. Durante este tiempo el ocupante sufre una serie de choques contra distintas zonas del vehículo, en unos instantes determinados. A las 60 milésimas de segundo, tras el choque, las rodillas del ocupante chocan con la zona baja del salpicadero a una velocidad cercana a los 50km/h, ya que el rozamiento con el asiento habrá provocado un pequeño frenado.

El choque de las rodillas hace que el torso superior se flexione hacia delante chocando finalmente con el volante a las 75 milésimas de segundo. Mientras que el torso se ha frenado, la cabeza sigue flexionando más pudiendo chocar con el parabrisas a las 100 milésimas de segundo tras la colisión. También es posible que la cabeza choque con el marco rígido del parabrisas, lo que puede causar lesiones más graves



Figura 3.7 – Movimientos del ocupante durante un choque a 50 km/h

Todos los sucesos anteriores pueden evitarse usando correctamente el cinturón de seguridad. Además de proteger de estos choques internos, el cinturón de seguridad garantiza al ocupante permanecer en su asiento cuando se produce la colisión. Este aspecto es la principal virtud del cinturón de seguridad, ya que consigue que el ocupante frene a la vez que lo hace el vehículo. Cuando se produce la colisión, el vehículo dispone de una distancia para su frenado, que corresponde con la zona del frontal que se deforma (a 50 km/h aproximadamente 60 cm.), lo que a su vez significa un determinado tiempo de parada. Cuanto mayor sea este tiempo de parada, menor aceleración de producirá en la colisión y por tanto las lesiones serán menos graves. La aceleración es la responsable de los daños producidos, ya que a mayor aceleración de una masa, mayor fuerza se produce y por tanto mayor daño. Logrando reducir la velocidad en el mayor tiempo posible, se conseguirán aceleraciones menores que generen fuerzas menores.

Hay que tener en cuenta que la velocidad por sí misma no supone ningún problema, puesto que constantemente viajamos a alta velocidad tanto en automóviles, trenes o aviones, y no sucede nada. Es la variación de velocidad, la deceleración, el factor que determina cuando estamos ante una situación donde se pueden producir daños, una colisión (alta deceleración) o ante un simple frenado (baja deceleración).

Usar el cinturón de seguridad significa que durante una colisión, nuestro cuerpo, al ir fijo al asiento, decelerará de la misma manera que lo haga el vehículo. De esta forma, se consigue reducir la velocidad del cuerpo de una forma progresiva, evitando la reducción de velocidad tan brusca provocada al chocar contra los elementos interiores del vehículo, que sucede cuando no se emplea el cinturón de seguridad.

En el ejemplo de la colisión a 50km/h, donde el vehículo se deformaba 60 cm en 90 milésimas de segundo, sería de esperar que el ocupante decelerara de la misma forma, pero en realidad no ocurre así. La única forma de decelerar de igual modo que el vehículo, es mediante cinturones de seguridad inextensibles que mantuviesen la espalda constantemente pegada al respaldo del asiento, pero esto sólo se emplea en vehículos de competición donde los sistemas de retención difieren de los cinturones de seguridad. En general, usando un cinturón de seguridad existe un cierto espacio extra para detener el cuerpo, que es el situado entre el volante y el pecho del conductor, que suele ser de unos 30 cm. Los cinturones de seguridad están diseñados para ofrecer un cierto alargamiento de forma que sea posible aprovechar ese espacio extra para detener el cuerpo en un mayor tiempo y por tanto generando unas fuerzas menores.

Contando con estos 30 cm. de más para la deceleración, se consigue que el ocupante experimente $2/3$ de la aceleración del vehículo, ya que el vehículo se detiene en 60 cm., mientras que el ocupante lo hace en 90cm..

Los cinturones de seguridad disponen de un mecanismo de bloqueo con el cual controlan el alargamiento del cinturón en la retención. Este bloqueo del cinturón debe producirse en el momento adecuado, ya que si se activa demasiado tarde supondría un mayor avance del cuerpo del ocupante con el consiguiente riesgo de impactar con el interior del vehículo. Por otra parte, no debe producirse prematuramente, puesto que aunque se reduce el riesgo de impacto con la zona interior, se disminuye la distancia de detención del cuerpo y por tanto se aumentaría la deceleración. Por esto, el bloqueo de los cinturones de seguridad debe buscar un equilibrio para conseguir la mayor distancia de detención posible sin que el cuerpo colisione con el interior del vehículo.

El cinturón de seguridad ofrece otros beneficios por el hecho de mantener el cuerpo fijo en una posición [8].

- ◆ Impedir la eyección de los ocupantes en los choques frontales, es decir, impiden que los ocupantes salgan despedidos fuera del vehículo.
- ◆ Protegen a los ocupantes en caso de vuelco, impidiendo que salgan despedidos del vehículo o que se golpeen con el interior del vehículo.
- ◆ En las colisiones laterales, al mantener al ocupante en una posición fija, minimizan el riesgo de ser alcanzado por el objeto exterior, que puede producir una gran intrusión en el habitáculo.
- ◆ En las colisiones por alcance, el cinturón de seguridad evita de la misma forma que lo hace en las colisiones frontales, que el cuerpo puede impactar contra el volante o el salpicadero.
- ◆ En general, en cualquier tipo de choque, evita las colisiones entre los ocupantes, que pueden llegar a ser tan peligrosas como las producidas contra cualquier parte del interior del vehículo.
- ◆ El uso del cinturón de seguridad reduce aproximadamente al 50% el riesgo de morir en accidente de tráfico.

3.2.2.1.1 Estructura del Cinturón de Seguridad

Los componentes de un cinturón actual de tres puntos de anclaje están representados en la *figura 3.8* [8]:



Figura 3.8 – Componentes de un cinturón de seguridad actual de tres puntos de anclaje

- 1.- **Anclaje inferior**, en la parte baja de la carrocería.
- 2.- **Anclaje superior**, en el pilar central de la carrocería.
- 3.- **Cinta**, elemento flexible destinado a sostener el cuerpo y a transmitir las fuerzas a los anclajes. En un principio se fabricaba en nylon pero luego se empleó el poliéster, ya que ofrecía la posibilidad de hacer la cinta más fina sin perder fuerza, a la vez que se reducía el estiramiento de la cinta sometida a tracción.
- 4.- **Hebilla de cierre**, une la cinta con la lengüeta de cierre.
- 5.- **Lengüeta de cierre**, cuando el cinturón está abrochado se engancha al sistema de cierre mediante el orificio que posee.

6.- **Anclaje del sistema de cierre**, une el sistema de cierre al suelo de la carrocería.

7.- **Anilla-guía o herraje de reenvío**, manda la cinta por la parte superior del torso.

8.- **Enrollador o Retractor**, elemento que almacena enrollada la cinta. Además es el encargado de bloquear la cinta. Consta a su vez de varios elementos:

- Carrete
- Ruedas dentadas
- Trinquete
- Barra de bloqueo
- Péndulo

9.- **Hebilla de anclaje o sistema de cierre**, que engancha lengüeta de cierre de forma que el cinturón queda abrochado.

3.2.2.1.2 Lesiones provocadas por el Cinturón de Seguridad

El cinturón de seguridad es altamente eficaz a la hora de evitar o reducir lesiones provocadas en un accidente de tráfico, sin embargo, hay que tener en cuenta que se pueden producir lesiones por su uso. Como el nombre de estos elementos indica, se debe producir una retención del cuerpo, y la única forma de conseguir esto es mediante un contacto directo entre el ocupante y el sistema de retención. En todo contacto aparecen unas fuerzas que son las responsables de que se puedan producir, o no, lesiones sobre el ocupante por usar en este caso, el cinturón de seguridad. Dependiendo de la severidad de la colisión, las fuerzas transmitidas por el cinturón serán de intensidad variable, lo que producirá lesiones más o menos graves. A pesar de este inconveniente, no hay que olvidar que por muy grave que sea la lesión producida por el cinturón, existe una alta probabilidad de que la lesión, en el caso de no usar el cinturón, sería mucho más grave [8].

Las lesiones producidas por el cinturón suelen concentrarse en dos zonas principalmente, la zona abdominal y la zona torácica.

Zona Abdominal

Este tipo de lesiones son provocadas por la banda de cadera, tanto en los cinturones de seguridad de dos puntos de anclaje como en los de tres. En general, estas lesiones suelen afectar en mayor grado a los órganos internos como el hígado o el bazo. Algunas de las posibles razones por las cuales se producen estas lesiones son las siguientes:

- ♦ *Una deceleración excesiva.* Los huesos pueden soportar bien la gran retención producida por el cinturón, sin embargo para los tejidos blandos de los órganos internos puede ser demasiado grande, y se pueden producir desgarros.
- ♦ *Mala colocación de la banda de cadera.* La banda debe ir siempre sobre la pelvis y no más arriba, ya que si la banda de cadera se sitúa sobre el abdomen, éste será quien reciba toda la presión ejercida por el cinturón. Esta gran presión ejercida sobre tejidos blandos, como vísceras u órganos internos, provoca grandes daños.
- ♦ *Un desplazamiento de la banda de cadera.* Debido a diferentes circunstancias, cuando se produce el movimiento del cuerpo hacia delante, cabe el riesgo que la banda de cadera se desplace de su posición ideal, deslizándose desde la pelvis, y colocándose directamente sobre el abdomen, comprimiéndolo severamente. Este fenómeno, en el cual se produce un deslizamiento del cuerpo por debajo de la banda de cadera, es conocido como el **efecto submarino**. Este movimiento, en el efecto submarino, suele provocar lesiones más graves y más deslocalizadas, ya que pueden afectar a miembros inferiores, rodillas, abdomen, parte baja del tórax y a la zona lumbar y dorsal de la columna.



Figura 3.9 – Efecto submarino

Existen varias medidas tomadas para minimizar el riesgo de la aparición del efecto submarino, como son, el mejor diseño y ubicación de los anclajes del cinturón o la utilización de asientos antideslizantes. También se emplean los airbag de rodilla para intentar evitar el efecto submarino y para reducir las lesiones de rodilla cuando no sea posible evitarlo.

Zona Torácica

Este tipo de lesión está vinculada al cinturón de seguridad de tres puntos de anclaje, y en concreto, a su banda de hombro. Esta banda es la encargada de retener toda la parte superior del cuerpo por lo que transmite una gran fuerza concentrada sólo en la banda del cinturón. La fuerza elevada concentrada, genera grandes presiones en toda la zona del cuerpo en contacto con la cinta, lo que provoca daños localizados en esa zona. Las lesiones suelen afectar sobre todo a las costillas y esternón, siendo comunes las fracturas.

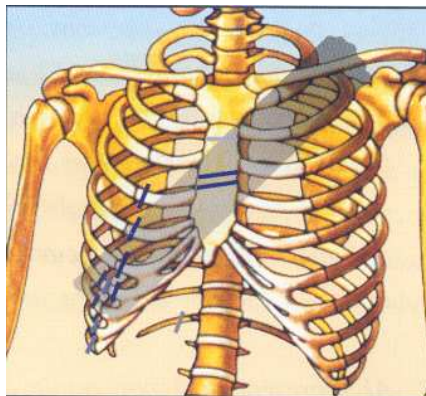


Figura 3.10 – Localización de las lesiones provocadas por el cinturón de seguridad

3.2.2.1.3 Uso del Cinturón de Seguridad

A pesar de que el cinturón de seguridad ha probado desde su aparición su gran efectividad para evitar o reducir las lesiones producidas por un accidente de tráfico, y además de ser obligatorio su uso, existe un gran número de personas que no lo usa habitualmente o que sólo lo usa en determinadas situaciones. Una de las ventajas del cinturón de seguridad, sin tener en cuenta su efectividad en la protección de los ocupantes, es que es necesario un simple, sencillo y rápido gesto para abrocharlo. Pero la principal desventaja, es que el hecho de usar cinturón es totalmente voluntario,

donde el ocupante tiene el poder de decidir usarlo o no. Este aspecto es importante recalcarlo porque es el único sistema de seguridad, tanto activa como pasiva, que actúa únicamente cuando el ocupante lo decide, a pesar de ser el más efectivo de todos a la hora de salvar vidas.

Por eso, se trabaja en dos direcciones diferentes. Por un lado, está la administración, que mediante sus campañas de divulgación, vigilancia y sanción intentan convencer a los usuarios para que opten por usar el cinturón de seguridad en todo momento. Y por otro lado, están los fabricantes de automóviles que intentan diseñar sistemas que obligan a los ocupantes a usar el cinturón de seguridad mediante señales luminosas o acústicas. Son medidas que pueden ser denominadas como “blandas”, ya que no obligan al uso del cinturón y sólo se limitan a recordar al ocupante que su cinturón no está abrochado. Estas son las únicas medidas posibles, ya que medidas más duras, como la de bloquear el encendido del motor cuando no se use el cinturón, no tendría demasiada aceptación por los compradores, puesto que al tratarse de una obligación, muchos de los compradores podrían ver violada su libertad de elección.

Por tanto, la única acción posible para conseguir el uso “total” del cinturón, es la empleada por la administración. Todavía deben aumentar los esfuerzos realizados, ya que el no uso del cinturón de seguridad sigue estando detrás de muchas de las muertes ocurridas cada año.

Un ejemplo muy significativo, es el dato extraído del informe sobre la siniestralidad durante la pasada Semana Santa 2005 [3]. En este informe se resalta que el 49% del número total de muertos en turismos y furgonetas, no llevaban el cinturón de seguridad puesto.

El dato de las muertes quizás es el más impactante y el más recordado por las personas, sin embargo, los datos estadísticos obtenidos de observaciones directas o de encuestas, tal vez sean los que mayor importancia tengan para las personas que trabajan para reducir la siniestralidad en las carreteras. Una de estas encuestas es “SARTRE 3. Proyecto Europeo sobre Actitudes y Conductas frente al Riesgo Vial” [10]. En este estudio aparece un punto dedicado exclusivamente al cinturón de seguridad, que revela la utilización “real” y el nivel de conocimiento sobre el cinturón de los españoles. Se destaca la palabra, real, ya que al tratarse de una encuesta, los participantes pueden no ser del todo sinceros en sus respuestas.

“Si se conduce con prudencia, el cinturón de seguridad no es necesario”:

El 24% de los conductores españoles está totalmente o bastante de acuerdo con esa afirmación. Por lo tanto, la mayoría sabe que el cinturón puede reducir riesgos en todos los casos, pero todavía hay que hacer un esfuerzo por reducir el grupo de desinformados, que es casi una cuarta parte de la muestra.

“En la mayoría de los accidentes el cinturón reduce el riesgo de heridas graves a conductores y pasajeros”:

El 88% está totalmente o bastante de acuerdo con esto, de modo que parece que el nivel de concienciación es alto, aunque no suficientemente.

“Sin cinturón me siento incómodo, como si me faltara algo”:

Opina así el 45% de los encuestados. No parece que el automatismo de abrocharse el cinturón esté integrado de forma generalizada.

“Con el cinturón existe riesgo de quedar atrapado en caso de emergencia”:

El 35% se muestra totalmente o bastante de acuerdo con ese planteamiento, por lo que no es de extrañar que algunos decidan no ponérselo en ocasiones.

	Siempre	Frecuentemente + Muy frecuentemente	A veces + Raramente	Nunca
Autopista/Autovía	81%	15%	3%	
Carreteras convencionales	75%	18%	5%	1%
Carreteras secundarias	65%	31%	11%	2%
Zona urbana	43%	17%	26%	13%

Tabla 3.1 – Uso del cinturón de seguridad según el tipo de vía.

Teniendo en cuenta estos resultados, es posible darse cuenta de que aún se debe conseguir un mayor uso que el actual, para que pueda ser aprovechado el 100% del potencial del cinturón de seguridad, y así de esta forma, la sociedad puede beneficiarse globalmente.

3.2.2.2 AIRBAG

El Sistema Airbag también es conocido como SRS, **S**istema de **R**etención **S**uplementaria. La traducción a español de la palabra airbag, es bolsa de aire, y básicamente el sistema airbag consiste en eso, en una bolsa de aire [11].

El airbag evita, cuando se produce una colisión, que el cuerpo del ocupante impacte contra cualquier elemento del interior del vehículo, al hincharse e interponerse entre el cuerpo y ese elemento del vehículo. Aunque esto puede parecer simple, requiere controlar muchas variables para que su funcionamiento sea correcto. Además de evitar un impacto directo con alguna superficie del vehículo, también consigue amortiguar los violentos movimientos del cuerpo cuando se produce una colisión.

El airbag trata de minimizar la colisión que se produce entre los órganos internos. Aunque es un buen complemento y ofrece cierta protección ante los impactos directos, su mayor utilidad es la capacidad de ofrecer una amortiguación extra, que el cinturón no puede ofrecer, para conseguir una parada del cuerpo más lenta, es decir, conseguir una deceleración menor. Con esta deceleración menor se consigue que las posibles colisiones entre los órganos internos sean de menos magnitud y por tanto se reduce el daño.



Figura 3.11 – Vehículo dotado de varios airbags

3.2.2.2.1 Funcionamiento del Airbag

Para explicar la forma de actuar de un airbag se empleará el ejemplo de los airbag frontales, puesto que son los más populares. Además, el funcionamiento de los distintos tipos de airbag es similar a estos [11].

Cuando se produce un choque frontal, un sensor cinemático detecta como ha sido el impacto. Si este impacto genera una deceleración que supera el límite preestablecido se activa el sistema airbag. En primer lugar, se emite un impulso eléctrico hacia el detonador del generador de gas, situado junto a la bolsa plegada, el cual produce una reacción química que genera una gran cantidad de gas, que hincha la bolsa.

La misión de los airbags frontales es la de proteger tanto al conductor como al acompañante. Para eso, se ubica un airbag en el volante y otro en la guantera o en el salpicadero. Los airbags permanecen ocultos bajo una cubierta del mismo material y aspecto que el resto del salpicadero del vehículo, pero poseen unas zonas diseñadas para permitir que cuando el airbag se active, la propia presión de la bolsa de aire rompa la cubierta permitiendo su salida.

Todo este proceso debe realizarse en el momento oportuno y a la velocidad correcta para que la bolsa de aire pueda interponerse a tiempo, entre el cuerpo del ocupante y el interior vehículo, evitando el contacto directo. El tiempo estimado de hinchado de un airbag de conductor suele ser de 30 milésimas de segundo, por tanto, el mecanismo de activación debe ser extremadamente rápido y preciso.

Una vez que el cuerpo impacta contra el airbag, éste debe deshincharse de forma controlada, para lo cual están equipados con unos orificios que se abren ante una determinada presión. La manera de deshincharse la bolsa puede llegar a ser tan importante como la forma de hincharse, puesto que de este vaciado depende el amortiguamiento del movimiento del cuerpo.

Los airbag frontales sólo se activan cuando la colisión se produce dentro de un ángulo de 30° con respecto a su eje longitudinal. Además, la colisión debe superar un límite establecido que puede ser equivalente a una colisión a unos 30 km/h contra un muro rígido. De esta forma se garantiza que el airbag no se active ante baches o pequeños golpes.

En general, el funcionamiento de todos los airbags es parecido, aunque existen diferencias de tamaño, de ubicación o de la complejidad del mecanismo y secuencia de activación. Además, cada airbag tiene un funcionamiento específicamente pensado para cada vehículo, puesto que la forma exterior de la carrocería, su peso y su

estructura hacen que en caso de colisión se necesite un tiempo de hinchado determinado, que puede ser totalmente distinto al de otro vehículo. Por tanto, el airbag de un vehículo no puede ser montado en otro distinto, aunque puedan ser aparentemente vehículos de características similares.

El airbag es de un solo uso. Una vez se haya activado debe ser sustituido por otro similar. También poseen una vida útil limitada, que puede variar dependiendo de sus propias características, pero suele oscilar en torno a los 15 años, tras los cuales debe ser sustituido aunque no se haya activado nunca.

Conociendo las fases de funcionamiento de un airbag en un choque tipo, a 54 km/h contra un muro rígido, podemos comprender la extrema precisión necesaria para que pueda cumplir su función [11] [12].

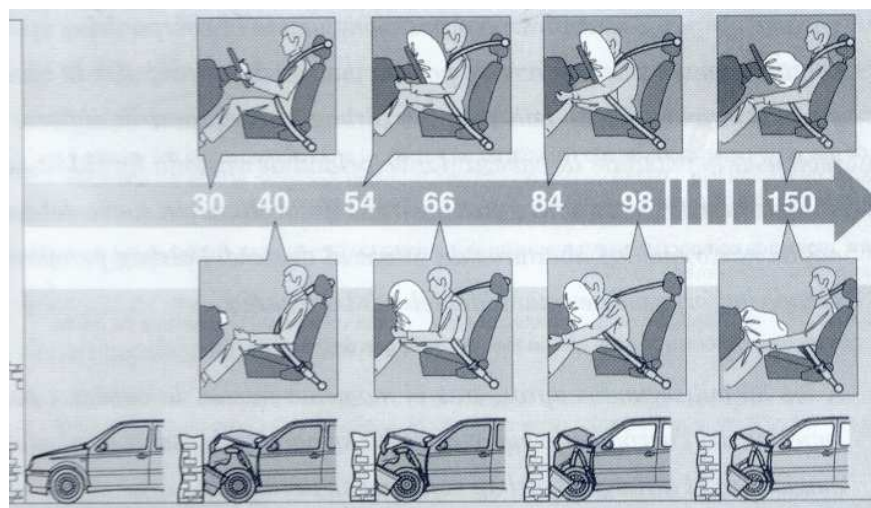


Figura 3.12 – Secuencia del funcionamiento del airbag durante una colisión

- ◆ En el momento de la colisión el conductor aún está en su posición normal.
- ◆ 15 ms. Los sensores de todos los dispositivos electrónicos de seguridad se activan. El vehículo se ha deformado 20 cm.
- ◆ 17 ms. El pretensor del cinturón ajusta al máximo la tensión para eliminar cualquier holgura.
- ◆ 18 ms. 28 centímetros de deformación. Se activa el airbag, haciendo que el detonador dispare el generador de gas. El ocupante continúa en su posición normal.

- ◆ 30 ms .La cubierta del airbag se abre por las zonas especialmente diseñadas para este fin y el airbag comienza a inflarse. La deformación llega hasta el motor, que comienza a compactarse.
- ◆ 35 ms.. 50 centímetros de deformación.
- ◆ 40 ms.. 55 centímetros de deformación.
- ◆ 50 ms.. 30 milisegundos después de la activación del sistema airbag, el cojín de aire alcanza su hinchado máximo a la vez que el ocupante comienza a hundirse en él. 65 centímetros de deformación.
- ◆ 75 ms.. Deformación casi completa. En este momento los ocupantes soportan la mayor deceleración.
- ◆ 80 milésimas de segundo tras el choque, la cabeza y el torso del ocupante se han sumergido hasta la máxima profundidad en airbag.
- ◆ 90 ms.. Deformación completa. El vehículo es 75 centímetros más corto.
- ◆ 95 ms.. El vehículo comienza a rebotar. Los ocupantes alcanzan la posición más adelantada.
- ◆ A los 110 milisegundos el cuerpo del ocupante empieza su movimiento de retroceso y el airbag prácticamente se ha vaciado.
- ◆ A los 150 milisegundos el choque ha finalizado. El airbag está vacío, se recupera totalmente la visibilidad y el ocupante ha vuelto a su posición inicial.

Esta secuencia de tiempos es orientativa puesto que depende del tipo de vehículo, el tipo de colisión o del fabricante del airbag, aunque en general las diferencias son mínimas. En el caso del airbag frontal del acompañante, el tiempo de hinchado suele ser algo mayor ya que posee más volumen, además, el cuerpo necesita más tiempo hasta que impacta contra la bolsa de aire.

3.2.2.2.2 Tipos de Airbags

Se pueden clasificar los distintos tipos airbags según su ubicación, tamaño y función [11].

3.2.2.2.2.1 FRONTALES

Dentro de los airbags frontales existe, el airbag del conductor y el airbag del acompañante.

Airbag del conductor

Va situado en la parte central del volante y su función es la de proteger la cabeza y el torso del conductor ante una colisión frontal. Tiene un volumen aproximado entre 60 y 80 litros. Su forma es circular para poder cubrir el volante. El tiempo de inflado es aproximadamente de 30 milisegundos.

Airbag del acompañante

Suele ir ubicado en la guantera o sobre ella, y su misión es la de proteger la cabeza y el torso del ocupante sentado junto al conductor, ante una colisión frontal. Su forma es rectangular y su volumen es de 160 litros aproximadamente, puesto que existe un mayor espacio libre entre el ocupante y el salpicadero. Por su gran tamaño, el tiempo de inflado es de 45 milésimas de segundo. Para conseguir este inflado tan rápido a pesar de su gran tamaño, es normal la utilización de 2 generadores de gas.

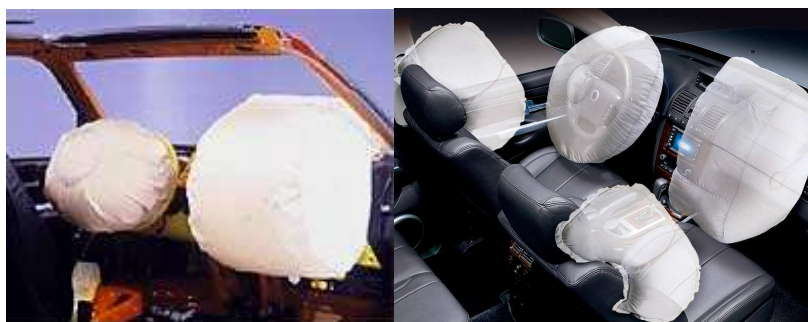


Figura 3.13 – Ejemplos de airbags frontales hinchados

Existe un sistema de airbag distinto, llamado **Eurobag**, ideado para su utilización en Europa. Es más pequeño que el airbag, ya que fue diseñado para proteger sólo la cabeza del ocupante. El Eurobag del conductor es de 35 litros, mientras que el del acompañante es de 65 litros. Ambos sistemas se diferencian porque el airbag se diseñó para Estados Unidos, donde el cinturón de seguridad no era usado mayoritariamente y por eso se necesitaba una protección extra del torso. El Eurobag puede ser más pequeño puesto que fue pensado para proteger únicamente la cabeza, ya que el torso se protegía con el cinturón de seguridad. Al ser de menor tamaño el Eurobag no usa pastillas de nitrato de sodio como combustible, sino que usa nitrocelulosa y nitroglicerina, cuyos productos de combustión son CO_2 , CO , agua y sodio.

Se han realizado diferentes estudios para comparar las ventajas de cada uno de los sistemas airbag. Las ventajas del Eurobag con respecto al Airbag son: mejor protección de la cabeza, menor presión ejercida sobre el fémur y menor deceleración en la zona inguinal. Por otro lado, las ventajas del Airbag son: menor deceleración relativa entre el vehículo y el conductor, mayor distancia total entre la cabeza y el volante y menor riesgo de lesiones en la zona cervical, ya que al ser la bolsa de mayor tamaño el ángulo entre cabeza y cuello se reduce.

3.2.2.2.2 LATERALES

Su finalidad es la de evitar o reducir los daños en una colisión lateral. Los posibles daños que puede evitar están localizados en la zona torácica, aunque también proporciona protección a la cadera, y en parte, a la cabeza. En general estos airbag son de un tamaño más reducido, entre 9 y 12 litros, pero a la vez deben hincharse más rápidamente, puesto que el espacio libre entre el ocupante y la puerta del vehículo es mínimo. El tiempo de inflado es cercano a las 12 milésimas de segundo.

Estos airbag pueden ir montados en la puerta o en el lado exterior del asiento. En el caso del airbag montado en el asiento, normalmente, va en el interior recubierto por la misma tapicería. Cuando se produce la colisión lateral el airbag se despliega a través de unas costuras especialmente hechas para romperse con la presión de la bolsa de aire. La gran ventaja del airbag montado sobre el asiento es que garantiza una misma protección, independientemente de la posición del asiento respecto al volante.



Figura 3.14 – Ejemplos de varios sistemas de airbags laterales. a) Airbag lateral montado en el asiento. b) Airbag lateral montado en la puerta. c) Airbag lateral montado en el asiento que proporciona una protección extra para la cabeza.

3.2.2.2.3 DE CABEZA

Cuando se produce una colisión lateral, la cabeza puede sufrir algún golpe con la ventanilla o bien con el techo. Para evitar esto, se emplea el airbag de cabeza. Existen principalmente dos variedades para este airbag, que cumplen con la función de protección de la cabeza y también la de impedir que parte del cuerpo del ocupante puede salir fuera del habitáculo en una colisión lateral.

El primero es el de tipo **diagonal**, que se despliega diagonalmente desde la parte alta de cada ventanilla. El segundo tipo es de tipo **cortinilla**, que se despliega desde el borde del techo y abarca tanto las plazas delanteras como las traseras. En ambos casos, estos airbags se activan a la vez que lo hacen los laterales, de forma que se complementan en la función de proteger al ocupante en caso de colisión lateral.



Figura 3.15 – Airbag de cabeza. a) Airbag diagonal. b) Airbag de cortinilla

3.2.2.2.4 OTROS

Los airbags, como todos los elementos de seguridad, están en constante desarrollo y mejora. De esta constante investigación han nacido y están naciendo airbags cada vez más especializados, para poder proteger de la mejor forma posible de los diferentes tipos de colisiones.

Un ejemplo de estos tipos de airbags son los **traseros**. Van ubicados en el respaldo de los asientos delanteros, de forma que ofrezcan protección para la cabeza de los ocupantes de las plazas traseras en los choques frontales.

También existe un airbag para las **rodillas**, ubicado bajo la columna de dirección y cuyo fin es reducir los daños de rodilla y pierna en caso de colisión frontal. También minimiza el riesgo de sufrir el efecto submarino provocado por el uso del cinturón de seguridad.

Existe un airbag incluido en el cinturón de seguridad, el **Airbelt**. Este cinturón ofrece un uso más confortable además de una función similar a la del airbag. Con este tipo de cinturón se minimiza el daño provocado por el cinturón de seguridad tradicional en la zona del pecho.

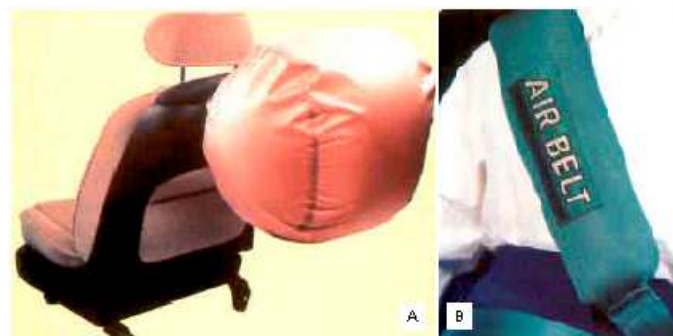


Figura 3.16 – Airbag de otro tipo. a) Airbag trasero. b) Airbelt

3.2.2.2.3 Eficacia del Airbag

A través de diversos estudios, se ha evaluado la protección ofrecida por los airbags en accidentes reales de tipo frontal [11].

Los conductores, con el cinturón de seguridad puesto, que sufren un accidente y su vehículo disponía de airbag tienen menos probabilidades de sufrir lesiones graves o muy graves, sobre todo en cabeza y tórax, tales como rotura de costillas o contusiones craneales. Sin embargo suelen presentar con mayor frecuencia lesiones como quemaduras y contusiones en cara, brazos y muñecas.

Los conductores que sólo disponían del cinturón de seguridad presentaban una mayor frecuencia de lesiones en cuello y hombros, propias del uso del cinturón. El airbag proporciona retención adicional a la parte superior del torso y limita las lesiones típicas del cinturón.

Uno de estos estudios trató de evaluar la efectividad de distintos métodos de retención, así como la combinación entre ellos, a la hora de prevenir lesiones por contacto de la cabeza o pecho con el interior del coche. Los distintos métodos de retención eran los siguientes: sin ninguna retención, con cinturón de tres puntos, sólo con airbag y con cinturón más airbag. Una de las conclusiones extraídas del estudio fue, que la combinación cinturón de seguridad y airbag tiene la menor proporción global de lesiones, reduciendo sobre todo las lesiones más graves. Además, los datos confirman que el responsable de la mayor reducción de las lesiones es el cinturón de seguridad, aunque el airbag ayuda a incrementar esa reducción. La otra conclusión destacable es que cuando el airbag se usa solo, los beneficios o la protección es similar a no usar ningún tipo de sistema de retención.

En el caso de una colisión lateral se ha demostrado como los airbags laterales son fundamentales para conseguir una óptima protección. Cuando se colisiona contra un objeto en un lateral del vehículo, la zona de deformación es pequeña y por tanto las medidas de seguridad como los airbags laterales son vitales. En concreto el airbag de cabeza, por proteger a la parte del cuerpo donde las heridas pueden tener consecuencias más graves, se ha mostrado como complemento imprescindible al airbag lateral. La capacidad de reducir el número de heridos de los airbags laterales, está limitada a que funcionen, de nuevo, junto con el cinturón de seguridad.

En resumen, el airbag ha demostrado su gran utilidad en la reducción de la gravedad de las heridas, en casi cualquier tipo de colisión, siempre y cuando funcione como complemento del cinturón de seguridad y no como sustituto. De hecho como ya se ha comentado, al airbag también es conocido como SRS, **Sistema de Retención Suplementario**.

Según algunos datos, el uso del airbag, junto con el cinturón de seguridad, puede reducir en un 60% el número de muertes en accidentes de tráfico [11].

3.2.2.2.4 Aspectos a Tener en Cuenta en su Utilización

Aunque el airbag ha demostrado su capacidad de protección para los ocupantes en caso de colisión, también hay que conocer sus posibles “*efectos secundarios*” o inconvenientes [11].

El origen de estos inconvenientes es la velocidad de despliegue y la presión producida por los gases. Este funcionamiento no puede ser cambiado, aunque si mejorado, puesto que esa rapidez de respuesta es en lo que se basa el airbag.

Si bien el airbag se despliega a una gran velocidad, ésta por sí misma no supone ningún problema. La situación de riesgo se produce cuando el conductor, o el ocupante en general, está situado ***fuera de posición***. Este término define la situación en la cual el airbag se encuentra con el cuerpo obstaculizando el despliegue completo de la bolsa. Puesto que la bolsa se despliega a gran velocidad, el impacto contra el cuerpo es de una gran violencia, pudiendo dañar el cuello, las costillas, el esternón o la región abdominal.

Hay circunstancias por las cuales un ocupante puede estar demasiado cerca del airbag, fuera de posición, en el momento de la activación del airbag como pueden ser: por intentar alcanzar algún objeto, por adormecimiento debido a algún fármaco o por haber sufrido un accidente menor o frenazo, que desplaza al ocupante hacia delante justo cuando se produce la colisión más fuerte que activa el airbag. Otra de las principales causas es la estatura del ocupante, que en el caso del conductor le hace adelantar su posición en exceso para poder llegar a los mandos. Por supuesto, no

llevar el cinturón de seguridad o llevarlo mal puesto, hará ante cualquier deceleración importante que el cuerpo se desplace hacia delante, aproximándose al airbag.

El desconocimiento del funcionamiento del airbag es determinante para que el ocupante esté demasiado cerca del airbag, puesto que en muchas ocasiones el conductor se posiciona cerca del volante sin ninguna motivo objetivo. En realidad sólo son necesarios unos 25 centímetros de separación entre la cubierta del airbag y el pecho del ocupante, para poder tener cierto nivel de seguridad.



Figura 3.17 - Conductor fuera de posición.

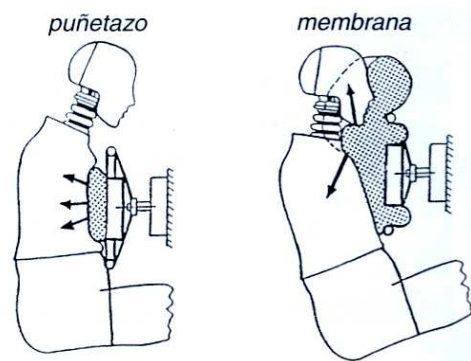


Figura 3.18 – Daños causados por el airbag al conductor fuera de posición.

El airbag también puede provocar **abrasiones** y **quemaduras**. Las quemaduras térmicas suelen estar producidas porque la piel del ocupante entra en contacto con los gases calientes del interior de la bolsa que salen a través de los orificios de escape. Las abrasiones o quemaduras mecánicas en un principio se pensó que eran causadas por la alta velocidad relativa entre la bolsa y la piel del ocupante, aunque posteriormente se descubrió que la causa de esas abrasiones era la presión de la bolsa. Se comprobó que con una elevada presión era posible conseguir la abrasión de la piel, aunque no existiese velocidad relativa entre la bolsa y la piel.

Llevar cruzadas las manos sobre el volante puede provocar graves lesiones en el caso de que el airbag se active. Debido a la gran violencia de despliegue, se puede llegar a producir fracturas de algún hueso y también puede impulsar el propio brazo del conductor impactando contra la cara con una gran fuerza.

3.2.2.3 EL HABITÁCULO DE SEGURIDAD

El concepto Habitáculo de Seguridad no hace referencia, como en los casos anteriores, a un dispositivo de seguridad electrónico o mecánico que se puede instalar o desinstalar en un vehículo, sino que determina un espacio o zona del mismo. Se puede definir como la zona interior de la carrocería o estructura del vehículo, donde viajan los ocupantes. En caso de accidente, debe dañarse y deformarse lo menos posible, puesto que de éste dependerá en gran medida la protección de los ocupantes. En realidad, el habitáculo de seguridad es una zona de la estructura del vehículo, y no se tendría por que separar ambos conceptos, sin embargo, se puede hacer esta distinción para diferenciar la zona que proporciona la protección a los ocupantes, ya que existen otras zonas de la estructura que realizan diferentes funciones.

Independientemente del nombre, lo cierto es que el habitáculo de seguridad, o la estructura del vehículo, debe evitar la intrusión de cualquier objeto externo que puede impactar con los ocupantes, proporcionando un suficiente espacio libre. A este espacio libre, se le denomina **espacio de supervivencia**. Cuanto mayor sea el espacio de supervivencia, mayor protección ofrecerá al ocupante y por tanto menor será el riesgo de lesión para estos.



Figura 3.19 – El habitáculo de seguridad, y las otras zonas de la estructura del vehículo.

Por la importancia que tiene el habitáculo de seguridad, es posible afirmar que se trata del principal sistema de seguridad pasiva que posee un vehículo. Sin embargo, hay que tener en cuenta un aspecto común que comparten todos los sistemas de seguridad pasiva, incluido éste, que es la necesidad de funcionar en conjunto con los otros sistemas para poder ofrecer un nivel de protección adecuado. El habitáculo de seguridad debe ser complementado por los sistemas de retención,

puesto que sin ellos, la protección para el ocupante se limitaría a evitar ser alcanzado por un objeto exterior, pero no impediría que su cuerpo colisione con el interior del vehículo.

Existe un aspecto que diferencia al habitáculo de seguridad de los demás sistemas de seguridad del automóvil. En todos los demás sistemas de seguridad, tanto activa como pasiva, el conductor o usuario puede comprobar y experimentar como funcionan estos sistemas en cualquier momento, sin que el vehículo experimente ningún tipo de perjuicio ni deterioro. Sin embargo, la comprobación de la seguridad ofrecida por el habitáculo de seguridad sólo puede realizarse durante una colisión violenta. La eficacia, a grandes rasgos, se verá reflejada si el vehículo queda destrozado pero mantiene intacta la zona destinada a los ocupantes.

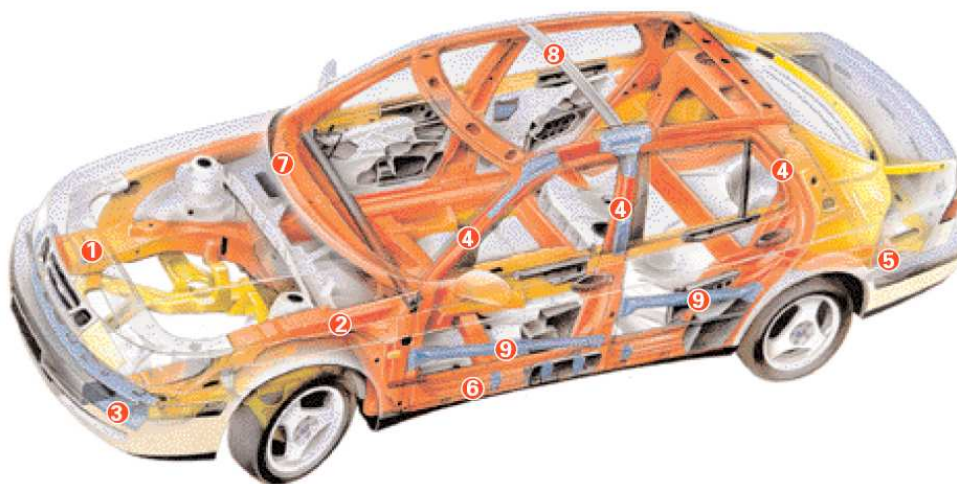


Figura 3.20 – Estructura de un vehículo. 1. Largueros delanteros 2. Largueros superiores 3. Travesaño delantero 4. Pilares 5. Largueros traseros 6. Largueros inferiores 7. Vigueta transversal 8. Techo 9. Barras laterales [13]

3.2.2.3.1 Cómo Actúa la Carrocería Ante una Colisión

La estructura de un automóvil, como todo elemento mecánico debe estar diseñada para poseer unas propiedades que le permitan cumplir con todas las exigencias y solicitudes que se puedan plantear durante su uso. Debe diseñarse para que aguante sin fallar, al menos, las condiciones de servicio que sufrirá y que fueron fijadas en el diseño.

La estructura del vehículo debe poseer una determinada **rigidez**, suficiente para soportar las diferentes fuerzas a las que será expuesta. Estas fuerzas irán desde fuerzas estáticas, como su propio peso o el de los ocupantes, hasta fuerzas dinámicas originadas durante el movimiento del vehículo.

Una de las condiciones de servicio para la que tiene que estar diseñada también la estructura, es una colisión. Durante una colisión, la principal cualidad de una buena estructura es tenga la **capacidad de absorber la energía** del choque, de manera que los ocupantes sufran menores daños. La energía del choque, es la energía cinética que el vehículo posee antes del impacto y que debe ser disipada o absorbida por la estructura del vehículo. Para lograr esto, la estructura dispone de varias zonas diseñadas exclusivamente para absorber la mayor cantidad de energía posible, y que por norma general, suelen tratarse del vano posterior y anterior. Además de estas dos zonas de absorción de energía, la estructura cuenta con el habitáculo de seguridad, que debe dañarse lo mínimo posible para ofrecer seguridad a los ocupantes. Por tanto, la estructura debe disponer de varias zonas de comportamiento opuesto. Unas zonas que deben deformarse absorbiendo la mayor cantidad de energía posible, y la zona del habitáculo de seguridad que debe deformarse lo menos posible [14].

La gravedad de un accidente no está determinada por la velocidad del vehículo antes de la colisión, sino por la deceleración. Ésta viene determinada por la masa y la rigidez de los objetos que colisionan entre sí.

Cuando el vehículo colisiona contra un objeto rígido, que no puede deformarse, toda la energía debe ser disipada por el propio vehículo. La deformación del vehículo aumenta hasta que se ha absorbido toda la energía cinética del choque, es decir, hasta que esta energía es igualada por la energía necesaria para deformar el vehículo. Si la zona diseñada para ser deformada no puede disipar toda la energía, se seguirá produciendo la deformación de la estructura llegando a deformarse el habitáculo de seguridad y pudiendo afectar a los ocupantes. Además, la deformación de las zonas diseñadas para tal fin debe producirse de la forma más lenta posible, para que la deceleración no sea excesiva y puedan dañarse igualmente los ocupantes. Cuanto mayor es la zona del vehículo que se deforma hasta que el vehículo se detiene, mayor será el tiempo de parada y por tanto menor deceleración sufrirá el ocupante si va fijo en el interior del habitáculo de seguridad.

La rigidez de la estructura del vehículo debe conservar el habitáculo de seguridad lo más intacto posible, y además, debe permitir su deformación de forma que la deceleración alcanzada no produzca daños a los ocupantes.

Una estructura altamente deformable ayudaría a parar el vehículo en una colisión en un periodo de tiempo muy grande, con lo que la deceleración sería muy baja y no provocaría lesiones en los ocupantes, pero sin embargo, no garantizaría que ningún objeto penetrara en el habitáculo de los ocupantes, al reducirse el espacio de supervivencia.

3.2.2.3.2 La Estructura en una Colisión Frontal

En función del tipo de colisión, la estructura del vehículo, y en particular el habitáculo de seguridad, debe comportarse de un modo u otro, ya que el riesgo para los ocupantes también variará [14].

Dentro de las colisiones frontales nos podemos encontrar con dos variantes: una colisión totalmente frontal, que ocurre cuando la totalidad del frontal del vehículo choca contra el objeto; y una colisión descentrada, que ocurre cuando no todo el frontal del vehículo choca contra el objeto, sino que la colisión se concentra en una porción de éste. El comportamiento del vehículo es diferente en cada caso.

Cuando el choque es totalmente frontal, la estructura alcanza una menor deformación, puesto que la fuerza de la colisión se reparte en toda la superficie del frontal, y por tanto, actúan todos los elementos resistentes de la estructura de igual forma. En estos casos la estructura puede aguantar mejor la colisión, consiguiendo menores deformaciones con lo que el habitáculo de seguridad tiene un menor riesgo de verse afectado. Sin embargo, aunque el habitáculo no sufra grandes daños, no significa que los ocupantes tengan menor riesgo de lesiones, ya que sufren grandes deceleraciones, aun usando los sistemas de retención.

Cuando el choque es descentrado, la estructura del vehículo se ve sometida a un mayor esfuerzo, puesto que toda la fuerza de la colisión se concentra en una zona más pequeña que en el caso de la colisión 100% frontal. La energía de la colisión es

absorbida por menos elementos resistentes y por tanto sufren una mayor deformación, ya que los elementos del lado opuesto del choque no se ven afectados y no intervienen en el proceso de absorción de energía. Para que toda la energía sea absorbida por una parte del frontal, se emplean elementos cuya función es la de transmitir parte de las fuerzas al lado opuesto de la colisión, para que los esfuerzos puedan ser repartidos entre ambos lados. Aunque se pueda repartir los esfuerzos, la mayor parte de la energía será absorbida por la zona donde se ha producido el choque y por tanto sufrirá una gran deformación. Por esto, en las colisiones descentradas, la estructura se verá más afectada, aumentando la probabilidad de dañar el habitáculo de seguridad. Cuanto más distribuidos estén los esfuerzos de una colisión frontal, sea del tipo que sea, mejor se protegerá el habitáculo de seguridad al lograr menor deformación de la estructura.



Figura 3.21 – Colisión frontal.

Se debe evitar que penetren en el habitáculo de seguridad elementos como la columna de dirección, el salpicadero, el techo, los largueros y montantes, los pedales y los paneles de la zona de los pedales, ya que pueden dañar gravemente a los ocupantes.

Es posible apreciar a grandes rasgos si el habitáculo de seguridad se ha visto afectado tras una colisión, observando si existe desplazamiento del montante del parabrisas hacia atrás, si en el techo o en el suelo aparecen pliegues y también si las puertas se han abierto, arqueado o desencajado de sus huecos.

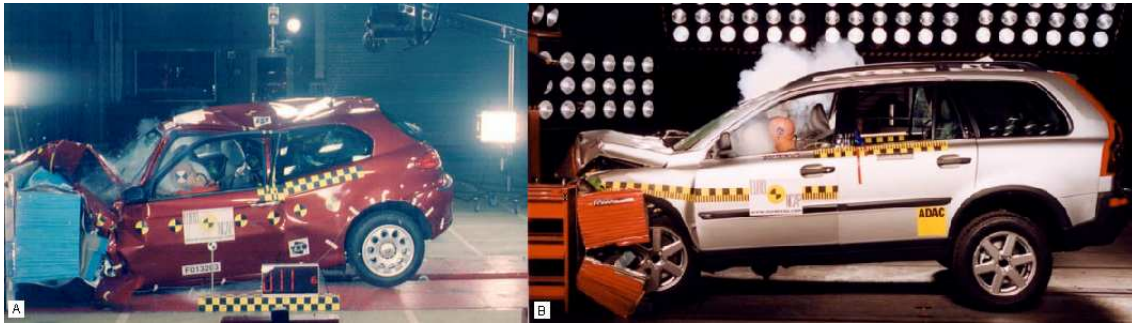


Figura 3.22 – Vehículos con comportamientos diferentes ante una misma colisión frontal.

3.2.2.3.3 Agresividad y Compatibilidad

Hasta ahora se he hablado de la seguridad que un vehículo ofrece a sus ocupantes ante colisiones contra objetos fijos, móviles, rígidos o deformables.

Cuando se produce una colisión entre dos vehículos, la protección para los ocupantes depende de como es la estructura del propio vehículo, pero a la vez depende en gran medida del vehículo contra el que se choca. No es lo mismo que el vehículo contra el que se choca sea más rígido y pesado, o que sea al contrario, menos rígido y pesado. En general, el vehículo más rígido, y probablemente más pesado, sufrirá menores daños que el vehículo contrario.

Cuando un vehículo colisiona con otro, se puede diferenciar entre la protección ofrecida a sus ocupantes, **autoprotección**, y la falta de protección ofrecida para los ocupantes del vehículo contrario. A esto último se le llama **agresividad** de un vehículo [14].

El concepto, **compatibilidad de un vehículo**, se trata de la combinación de la autoprotección y la agresividad. Un vehículo compatible con los demás, debe ofrecer una buena autoprotección y una baja agresividad.

Los factores que determinan si un vehículo es compatible o no, son principalmente: su masa y su estructura.

Masa

La masa es el factor que más influencia tiene en la compatibilidad entre vehículos. Aunque intuitivamente se sabe que un vehículo pesado en una colisión frontal empujará al más ligero hacia atrás, este hecho se demuestra por el principio físico de la conservación de la cantidad de movimiento:

$$masa_{vehículo\ 1} \cdot \overrightarrow{velocidad_{vehículo\ 1}} + masa_{vehículo\ 2} \cdot \overrightarrow{velocidad_{vehículo\ 2}} = (masa_{vehículo\ 1} + masa_{vehículo\ 2}) \cdot \overrightarrow{velocidad_{final}} \quad [Ec. 3.1]$$

Los términos a la izquierda del signo igual, son referidos al momento anterior a la colisión, mientras que, los que están a la derecha, son después de la colisión. El término $velocidad_{final}$ es la velocidad que tendrán los vehículos suponiendo que ambos permanecen juntos tras la colisión. El vehículo más pesado se identifica con el número 1 y el más ligero con el número 2.

Según esta ecuación, el cambio de velocidad del vehículo más pesado, $(velocidad_{final} - velocidad_{vehículo1})$, será menor que el cambio de velocidad del vehículo más ligero, $(velocidad_{final} - velocidad_{vehículo2})$.

En una colisión, la diferencia de velocidad, antes y después de la colisión, es un parámetro que muestra la gravedad de la colisión. Aunque realmente el parámetro que determina la gravedad de una colisión, desde el punto de vista de los ocupantes, es la deceleración sufrida, lo cierto es que una diferencia de velocidad mayor, supondrá también una deceleración mayor.



Figura 3.23 – Choque entre vehículos de masas diferentes. Con esta prueba puede comprobarse la compatibilidad de los vehículos. Como puede verse en el fotograma b, el vehículo más pesado empuja al más ligero.

Cuando un vehículo colisiona frontalmente con un vehículo más pesado, circulando a la misma velocidad, este vehículo más ligero sufre un accidente más severo que si hubiese chocado contra una barrera rígida,

porque el cambio de velocidad es mayor. En el choque contra la barrera rígida la velocidad final es 0, mientras que en el caso del choque contra un vehículo más pesado, la velocidad final será negativa a la que llevaba al inicio, lo que significa una diferencia de velocidad mayor.

Tanto en el caso de un vehículo pesado como en el caso de uno ligero, se aprecia que son incompatibles teóricamente, si no son diseñados expresamente para conseguir la compatibilidad. El vehículo pesado teóricamente se ve perjudicado en la autoprotección cuando colisiona con una barrera rígida, pero sale beneficiado cuando se produce una colisión con un vehículo ligero, mostrando una mayor agresividad. En el caso del vehículo ligero, cuando colisiona con una barrera rígida su menor peso, teóricamente debe mejorar su autoprotección, mientras que si colisiona con un vehículo más pesado su autoprotección será pequeña, al igual que su agresividad.

Rigidez Estructural

Cuando dos vehículos colisionan frontalmente, la energía absorbida por cada vehículo, y por tanto, su deformación, depende únicamente de la rigidez de cada estructura. La rigidez es la resistencia que muestra una estructura para deformarse, con lo cual, el vehículo menos rígido se deformará más. Si la deformación no afecta al habitáculo de seguridad, la gravedad de las lesiones será proporcional a la deceleración sufrida por los ocupantes [14].

Para garantizar la compatibilidad entre vehículos ambas estructuras deben absorber toda la energía de la colisión sin que haya intrusión en el habitáculo de seguridad. De esta forma se consigue que los daños se distribuyan entre los dos vehículos.



Figura 3.24 – Colisión frontal entre dos vehículos idénticos. En este caso, las deformaciones serán iguales al tener similares rigideces.

El diseño de los vehículos ha cambiado en los últimos años buscando una mayor compatibilidad entre vehículos. Las estructuras se diseñaban para que resistiesen los impactos contra barrera a 50km/h y que alcanzasen una deformación del frontal de unos 50 cm. Este diseño era adoptado por muchos fabricantes, de forma que sus vehículos ante el impacto contra barrera, se comportaban de igual forma, independientemente de su masa y tamaño. Cuando se colisiona contra una barrera rígida, como ya se ha visto, la masa es el parámetro fundamental, ya que a mayor masa, mayor energía es necesario absorber. Un vehículo ligero si se deforma la misma longitud que un vehículo pesado, significa que su estructura es menos rígida que la del pesado, ya que al tener que absorber menos energía cinética, la deformación debería ser menor, si ambos vehículos tuviesen la misma rigidez. De esta forma, aunque el diseño garantizase la protección ante la barrera rígida, estaba provocando que hubiese una diferencia de rigidez frente a los vehículos más pesados, provocando mayores daños en la estructura, al chocar contra vehículos de una rigidez mayor.

La estrategia para conseguir una mayor compatibilidad entre vehículos es conseguir una deformación similar, pero en esta ocasión, se dará cuando colisionen ambos vehículos frontalmente. Esta igualdad en la deformación se consigue con un aumento de la rigidez lineal proporcional a la deformación hasta un límite en el cual, ya las estructuras se comportan de forma individual.

Si hasta este límite, la deformación es igual en ambos vehículos, la energía disipada será igual y esto significa que la rigidez relativa entre los dos vehículos será la misma, evitando por tanto que exista afectación en ninguno de los habitáculos de seguridad. De este modo, se garantiza un mejor comportamiento ante el choque frontal con otro vehículo, sin influir teóricamente en el impacto contra barrera rígida.

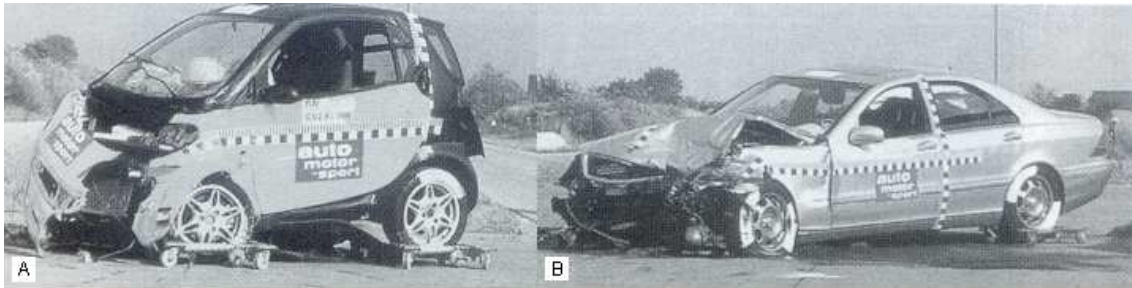


Figura 3.25 – Vehículos con buena compatibilidad. En las figuras a) y b), se pueden ver como estos vehículos se han diseñado para mantener la igualdad de rigideces.



Figura 3.26 – Vehículo con mala compatibilidad. El vehículo de la figura a), al mostrar tal mal comportamiento ante barrera, donde se observa una baja rigidez (por la excesiva deformación), evidencia que si chocase contra el vehículo de la figura b), alcanzaría una mayor deformación.

Geometría Estructural

La interacción entre las estructuras de dos coches que colisionan frontalmente no siempre se produce de forma adecuada. Las estructuras frontales están formadas por largueros y travesaños, que son los elementos encargados de absorber la energía de la colisión. Si estos elementos en ambos vehículos no están bien alineados vertical y horizontalmente, durante el choque puede ocurrir que no colisionen los unos contra los otros y por tanto la absorción de energía no sea del todo eficaz. Si las zonas resistentes están a diferente altura, la zona de deformación de un vehículo pasará por encima de la del otro y por tanto el proceso de absorción de energía será deficiente. Si ocurre esto, habrá más riesgo de intrusión en el habitáculo de seguridad, probablemente en los dos vehículos.

También puede existir discrepancia geométrica en los choques laterales. Si las zonas absorbentes de energía laterales de un vehículo están a distinta altura que los elementos deformables del frontal del otro vehículo, de

nuevo, los habitáculos de seguridad pueden verse afectados, sobre todo en el vehículo que sufre la colisión en su lateral.

Muchos de estos problemas de incompatibilidad geométrica se producen cuando los vehículos que chocan pertenecen a segmentos o clases diferentes, como por ejemplo: todoterrenos, berlinas de lujo, utilitarios, furgonetas, etc. Cuando existe una diferencia de tamaño y altura considerable, la incompatibilidad geométrica es más importante.



Figura 3.27 – Incompatibilidad estructural entre vehículos

3.2.3 ENSAYOS DE CHOQUE

3.2.3.1 QUÉ SON Y PARA QUÉ SIRVEN

Los ensayos de choque, o más conocidos como “crash test”, son una forma de evaluar la seguridad pasiva del automóvil de forma global, y casi la única forma de verificar la protección de la estructura del vehículo.

Los crash tests consisten en someter al vehículo a una serie de colisiones que simulen distintos tipos de choques, para poder conocer como se comportan los vehículos en cada situación. Todo modelo de vehículo antes de salir al mercado debe ser sometido a distintos ensayos de choque, realizados tanto por el propio fabricante como los sometidos por los organismos de homologación, de forma que hasta que el vehículo no supera estos ensayos no puede ser vendido.

Mediante estas pruebas de choque se evalúa el comportamiento del vehículo en un accidente y la afectación de los ocupantes.

Los crash test se llevan haciendo decenas de años, pero es sólo a partir 1978, año de fundación del NCAP de Estados Unidos, cuando los futuros compradores pueden conocer la seguridad ofrecida por la estructura del vehículo y el nivel general de protección de la seguridad pasiva. Desde que los resultados de los crash test pueden ser conocidos, los compradores tienen otra cualidad o característica más, para decidir qué vehículo comprar, como lo puede ser la seguridad activa, el consumo, las prestaciones, el confort, el diseño, etc.

3.2.3.2 QUIÉN LOS REALIZA

La realización de los ensayos de choque o crash test es llevada a cabo por un número limitado de organismos o entidades. Cada una de estas entidades realizan los ensayos de choque con fines distintos, y por este motivo, las pruebas suelen ser diferentes, aunque todos los ensayos buscan poner a prueba la seguridad pasiva del vehículo.

Los crash test son realizados principalmente por los tres siguientes colectivos:

Fabricantes

Todos los fabricantes someten sus vehículos a distintos ensayos de choque durante el proceso de diseño. Estas pruebas se realizan en las últimas fases del diseño de los nuevos modelos, para comprobar que estos vehículos son aptos para su salida al mercado. Desde que se comienza a crear un nuevo modelo de vehículo, los fabricantes realizan el diseño para que pueda superar los requerimientos de homologación, que obligan a superar ciertas pruebas para comprobar que el vehículo alcanza el nivel de seguridad exigido.

Durante las distintas etapas del diseño de un vehículo, se emplean herramientas informáticas de simulación con las cuales se puede ver el comportamiento del vehículo ante diferentes tipos de colisiones. De este modo, pueden detectarse los elementos que no se comportan del modo adecuado y deben ser modificados. Cuando las simulaciones realizadas por ordenador muestran una buena respuesta del vehículo, se pasa al siguiente paso, que es, realizar esos mismos ensayos simulados sobre los prototipos de los vehículos reales.

Los crash test son de mucha utilidad para los fabricantes puesto que con ellos pueden obtener varias conclusiones:

- ◆ Les sirven para comprobar sobre un modelo real, el comportamiento ante distintos tipos de colisiones al vehículo.
- ◆ Conocer la seguridad pasiva ofrecida por su nuevo vehículo.
- ◆ Se puede comparar el resultado final del ensayo real con los resultados obtenidos mediante la simulación y que fueron los que se emplearon en el diseño. Es posible observar daños o comportamientos del vehículo que no fueron mostrados en las simulaciones. En estos casos es necesario cambiar el diseño de esos componentes que fallan o introducir modificaciones en las simulaciones.
- ◆ Ayudan a comprender mejor una colisión real y de este modo, todos los datos reales pueden ser utilizados para mejorar las futuras simulaciones hechas por ordenador, mejorándolas y haciéndolas cada vez más reales.



Figura 3.28 – Pruebas de choque realizadas por Volvo a sus modelos

Organismos de Homologación

Como cualquier artículo que sale al mercado, un vehículo debe ser inspeccionado para verificar que cumple con la normativa vigente. Por la complejidad que presenta un vehículo, se verifican diferentes aspectos como son las emisiones, compatibilidad electromagnética, equipamientos básicos y sobre todo la seguridad [15][16].

Dentro de la seguridad, se verifican aspectos tanto de seguridad activa, realizando pruebas de conducción en pistas de ensayo, como de seguridad pasiva, realizadas en laboratorio.

Aunque la seguridad pasiva se puede verificar elemento por elemento mediante distintas pruebas, la mejor forma de evaluación es a través de los ensayos de choque. Por eso, los crash test realizados para la homologación de los vehículos adquieren una gran importancia.

Las pruebas de verificación para la homologación suelen ser realizadas por diferentes centros que se dedican especialmente a estas tareas. Los ensayos de choque se realizan siguiendo la normativa que cada país determina para la homologación de los vehículos que circularán por sus carreteras. De esta forma, un único centro de verificación puede realizar la homologación de los vehículos para diferentes países, simplemente realizando las pruebas según las distintas normas. Un ejemplo de los centros que se encargan de verificar los vehículos para su homologación, es el INTA, Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial.

Como ya se ha comentado, cada país puede tener su propia normativa de homologación, aunque realmente muchos países comparten la misma normativa. En Europa existe una única normativa aplicable en todos los países de La Unión. Países como Estados Unidos, Canadá, Japón y Australia emplean el mismo tipo de crash test, aunque luego pueden existir diferencias en los parámetros a verificar o en los valores de estos [14] [17].

Organizaciones NCAP

Los consorcios NCAP, (**New Car Assessment Programme**) o Programas de Valoración de Automóviles Nuevos, son asociaciones formadas por diferentes entidades cuyo propósito es valorar la seguridad de los nuevos vehículos que salen al mercado. Para hacer esto, se realizan diferentes tipos de crash test sobre el vehículo probado.

Una vez realizados los crash test, la seguridad de cada vehículo es evaluada en función de una serie de parámetros perfectamente definidos. Los datos recogidos en las pruebas de choque, son traducidos en una escala de puntuación, que es fácilmente interpretable por los futuros compradores.

Las pruebas realizadas por estos organismos, suelen ser diferentes a las realizadas para la homologación de un vehículo, siendo en muchos casos, pruebas que sometan al automóvil a las situaciones más comprometidas con la seguridad.

Con la aparición de los consorcios NCAP, los compradores han podido conocer fácilmente la seguridad pasiva ofrecida por los diferentes vehículos. Gracias al criterio seguido en la realización de estas pruebas, los compradores pueden comparar la seguridad ofrecida por diferentes vehículos.

La asociación NCAP más conocida en España es el consorcio europeo, EuroNCAP, aunque existen otros en Japón, Australia o Estados Unidos.

3.2.3.3 RESISTENCIA DEL CUERPO HUMANO A IMPACTOS Y DECELERACIONES

Antes de entrar a describir los diferentes tipos de crash test es necesario exponer los límites del cuerpo humano a impactos, ya que son utilizados en la mayoría de las pruebas de choque, como la referencia en la estimación de la seguridad pasiva de un automóvil.

Los parámetros de medida de la tolerancia del cuerpo humano a impactos y deceleraciones se pueden definir como unos resultados de ensayos, o unas cantidades derivadas de unos resultados de ensayos, cuyos valores están correlacionados con la ocurrencia de una lesión. Es decir, son una medida de unas sollicitaciones físicas sobre el cuerpo humano que indican si dichas sollicitaciones son suficientes para provocar una lesión [21].

Gran parte de la información que se dispone sobre los niveles de tolerancia del cuerpo humano se basa en estudios realizados con animales o con cadáveres, por lo que existen dudas sobre la exactitud con la que se pueden extrapolar a las lesiones en el cuerpo humano y, más concretamente, sobre las formas en las que se producen dichas lesiones, los niveles de excitación a los que se producen las lesiones y las escalas necesarias para convertir las medidas realizadas con animales y cadáveres a medidas aplicables a las personas.

En los siguientes subapartados se exponen los criterios de tolerancia de la cabeza (criterio combinado de aceleración y duración de la sollicitación), el pecho (aceleración y compresión) y el fémur (compresión). Dichos criterios están actualmente en vigor y sirven de base para la homologación de los vehículos en relación con la normativa de seguridad. También se exponen los criterios propuestos para otras partes del cuerpo.

Tolerancia de la Cabeza (Head Injury Criterion, HIC)

La tolerancia de esta parte del cuerpo se ha definido en términos de una combinación entre dos parámetros: la aceleración efectiva a la que se somete (expresada en G's) y la duración de dicha aceleración efectiva (expresada en milisegundos). La mayor parte de los datos de que se dispone para la

determinación de este criterio de tolerancia se han obtenido en ensayos de impacto con cráneos de cadáveres y con animales.

Sobre la base de anteriores investigaciones, en 1972 se definió un nuevo criterio, el Criterio de Lesión sobre la Cabeza (Head Injury Criterion, HIC), cuya última revisión en 1986 se expresa:

$$HIC = \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a dt \right]^{2,5} \cdot (t_2 - t_1) \quad [\text{Ec. 3.2}]$$

Donde: a es la aceleración resultante sobre la cabeza
 $t_2 - t_1$ es menor o igual a 36 milisegundos
 t_2, t_1 se eligen de forma que HIC se haga máximo

Esta expresión ha permitido establecer un valor de resistencia de la cabeza a impactos y deceleraciones que se ha fijado en un HIC ≤ 1000 .

Hasta 1986, el intervalo de tiempo ($t_2 - t_1$) se definía como aquel intervalo durante el impacto que maximizaba el valor del HIC. A partir de entonces dicho intervalo se limitó a un máximo de 36 milisegundos. Una interpretación de este límite puede ser la siguiente: suponiendo que la aceleración es constante durante todo el tiempo, un intervalo de 36 milisegundos para un valor máximo de $HIC = 1000$ corresponde aproximadamente a una aceleración constante sobre la cabeza de 60 g.

Tolerancia del Pecho

El valor de tolerancia para esta parte del cuerpo se expresa en una aceleración máxima de 60 g.

Este criterio se basa principalmente en medidas de aceleración realizadas sobre voluntarios y en otros datos derivados de caídas libres accidentales.

En otros periodos, incluso posteriores a 1971 (fecha en la que este criterio se estableció por primera vez), se han mantenido criterios diferente,

fundamentalmente porque se trataba de diferenciar las lesiones en tejidos blandos de tórax (corazón, pulmones, membranas, vasos sanguíneos) de las lesiones en tejidos duros (costillas, esternón y columna vertebral). Sin embargo, en la práctica esta distinción no es fácil de aplicar, ya que en muchos casos las estructuras de los huesos están envueltas en lesiones sobre los órganos blandos, como se describió en el apartado 4.

Otras fuentes establecen unos valores de tolerancia de las aceleraciones de impacto sobre la columna vertebral entre 40 y 10 g., manteniendo el mismo valor de 60 g para la caja torácica.

Existe un segundo valor de tolerancia que expresa el esfuerzo máximo de compresión sobre el pecho, y que establece que **el esfuerzo de compresión sobre el pecho, medido en el plano medio sagital** (plano que divide al pecho en sus mitades derecha e izquierda), **no puede provocar una reducción de la distancia entre el esternón y la columna de más de 3 pulgadas.**

Tolerancia del Fémur

Se considera que el esfuerzo máximo de compresión que puede soportar el hueso del fémur es de 10000 N.

En realidad, aunque se pretende que esta fuerza máxima sobre el fémur corresponda a un nivel límite para las fracturas de fémur, en la práctica impactos de esta magnitud sobre la rodilla han producido roturas de rótula, de fémur y de la cavidad cotiloidea de la pelvis.

Tolerancia de la Rodilla

Esta propuesta pretende proporcionar una indicación sobre cuánto se puede desplazar hacia atrás la pierna (región desde la rodilla al talón) con respecto al extremo inferior del fémur cuando el esfuerzo se aplica por debajo de la rodilla.

Se ha propuesto un límite de **desplazamiento de 15 milímetros**, valor que representa el límite elástico del ligamento cruzado posterior. Si la sollicitación es tal que se excede este límite, el ligamento se desgarrará o incluso de romperá.

Tolerancia del Cuello

También se proponen valores máximo de los esfuerzos y momentos aplicados sobre el cuello y sus uniones al cráneo y a los hombros. Concretamente, se especifican unos valores máximos del esfuerzo a cortadura en función de la duración de la sollicitación, representados posteriormente en la *figura 3.30*.

3.2.3.4 TIPOS DE CRASH TEST

Existen distintos tipos de ensayos de choque, en los cuales se verifican diferentes aspectos del vehículo ante las colisiones. Sin embargo, globalmente se puede hablar de que existen dos principales ensayos de choque, de los cuales hay variaciones. Además de estos dos tipos de ensayos de choque, se realizan otros más especializados para cubrir situaciones más específicas.

Los ensayos de choque más importantes son:

- ♦ **Frontal.** Existen distintas variaciones donde el vehículo se hace colisionar contra una barrera rígida, una barrera deformable o contra otro vehículo. Además de emplearse diferentes objetos, los choques se pueden realizar de diferentes ángulos entre el vehículo y el objeto con el que choca. Otra posibilidad de choque es, hacer colisionar el vehículo con el 100% del frontal o con una porción menor de éste.
- ♦ **Lateral.** Se pueden emplear distintos objetos con el que hacer colisionar el vehículo. Se emplean barreras deformables, postes rígidos o distintos vehículos. De la misma manera, se puede modificar tanto el ángulo, como la zona de la colisión.

En ambos tipos de ensayo, se puede modificar la velocidad de colisión, con lo cual se consiguen comportamientos distintos, ya que la velocidad del vehículo es uno de los principales factores que hacen variar el resultado final de la colisión.

En los siguientes puntos, se explica el procedimiento y la información que se obtiene de los diferentes crash test. Para ello se tomarán las pruebas de choque de homologación para los vehículos nuevos en Europa.

Los procedimientos de ensayo de choque frontal y choque lateral, están definidos, respectivamente, en la Directiva 96/79/CE y en la Directiva 96/27/CE del Parlamento Europeo [18][19].

Por ser el ensayo más relacionado con el tema de este proyecto, sólo se describirá el ensayo frontal.

Ensayo Frontal Europeo

Hasta 1998 el ensayo de homologación europeo consistía en hacer chocar al vehículo frontalmente contra una barrera rígida de hormigón a 48 km/h, y donde sólo se comprobaba la intrusión del volante en el habitáculo de seguridad. El choque era 100% frontal, algo que no correspondía con los accidentes entre vehículos reales. Además, la estructura rígida tampoco reproducía fielmente un choque real, puesto que también, en la mayoría de las ocasiones los objetos contra los que se chocan eran deformables[14].

Para desarrollar un ensayo que se ajustara más a la realidad se optó por hacer chocar el vehículo con un cierto ángulo, para introducir un factor de descentrado en la colisión, pero la barrera seguía siendo totalmente rígida.

Con la Directiva 96/79/CE, se solucionó el problema de la barrera rígida introduciendo la barrera deformable descentrada (Offset Deformable Barrier, ODB). Esta barrera está construida de aluminio en estructura de panal de abeja, con la que se consigue una respuesta más parecida a la estructura de los vehículos. A esta nueva barrera deformable, se añadió la realización del choque con un 40% de superposición en el lado del conductor. Se aumentó la velocidad de ensayo hasta los 56 km/h. Además, se comenzó a usar maniquíes de prueba o crash test dummies, Hybrid III, en los asientos delanteros, para poder conocer la respuesta de los cuerpos humanos en las colisiones.

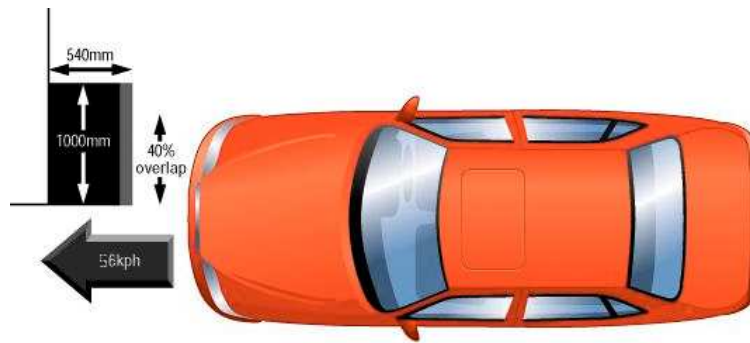


Figura 3.29 – Esquema del ensayo frontal europeo

Con este nuevo tipo de ensayo, se conseguía una mejor evaluación del comportamiento de la estructura del vehículo, y, del habitáculo de seguridad en particular.

En el apartado de **Requisitos Técnicos** de la directiva, se especifican detalladamente cada uno de los pasos a realizar antes y después del ensayo [18].

Requisitos técnicos

1. Ámbito de aplicación

2. Definiciones

3. Requisitos

Apéndice 1: Procedimiento de ensayo

Apéndice 2: Determinación de las normas de comportamiento

Apéndice 3: Disposición e instalación de los maniquíes y ajuste de los sistemas de retención

Apéndice 4: Procedimiento de ensayo con carro

Apéndice 5: Técnica de medición durante los ensayos: instrumentación

Apéndice 6: Definición de la barrera deformable

Apéndice 7: Procedimiento de certificación de la pierna y del pie del maniquí

Los puntos en los que se determina como debe realizarse el ensayo son:

Apéndice 1: Procedimiento de ensayo. Algunos de los aspectos principales son los siguientes:

- ◆ La barrera debe situarse perpendicularmente a la trayectoria del vehículo.
- ◆ El vehículo debe impactar contra la barrera con el $40\% \pm 20\text{mm}$. de su frontal, en el lado del conductor.
- ◆ La masa del vehículo debe ser en orden de marcha con el depósito de combustible lleno, al menos al 90%. Los circuitos de fluidos pueden estar vacíos, pero la masa de los líquidos será compensada. Si la masa de los equipos de medición supera los 25 kg., se compensará mediante reducciones de masa.
- ◆ Las puertas deben estar cerradas, pero no bloqueadas. El resto de elementos del habitáculo o interior deben estar en su posición normal de uso, a excepción de los reposacabezas que deben estar en su posición más alta.
- ◆ La propulsión del vehículo puede ser a través de cualquier medio. En el momento de la colisión el vehículo no puede estar bajo la acción de ningún elemento de guía o propulsión.
- ◆ La velocidad del vehículo en el momento de la colisión debe ser de 56 ± 1 km/h. Si la velocidad fuese más alta y el vehículo cumple con todos los requisitos, se dará por válida la prueba.

Apéndice 3: Disposición e instalación de los sistemas de retención.

Algunos de los aspectos principales son los siguientes:

- ◆ El maniquí del asiento del conductor será situado de forma que su plano de simetría coincida con el plano que atraviesa el centro del volante y es paralelo al plano longitudinal del vehículo. El maniquí del asiento del acompañante estará situado simétricamente al del conductor, siempre y cuando lo permita el propio asiento.
- ◆ Los brazos de los maniquíes estarán lo más pegados al cuerpo posible. Las manos del conductor estarán en el volante, de forma que sus palmas contacten con el aro exterior. Los pulgares estarán unidos al volante mediante cinta adhesiva de forma que la mano pueda despegarse al aplicarse una fuerza superior a 22 N.
- ◆ Los torsos de los dummies estarán apoyados contra el respaldo del asiento.
- ◆ El pie derecho del conductor estará situado sobre el acelerador con el talón apoyado en el suelo. El pie izquierdo del conductor y los pies del

acompañante estarán dispuestos lo más adelantados posible, de forma que el talón repose en el suelo y la planta del pie lo haga sobre la zona elevada del suelo.

- ◆ Los maniqués y los instrumentos de medida deben estar a una temperatura estabilizada de 19-22 °C.
- ◆ Los dummies deben vestir prendas de algodón elásticas ajustadas, de manga corta y pantalón hasta la mitad de las pantorrillas. También deben estar calzados.
- ◆ Una vez colocados los dummies en su posición, se debe colocar el cinturón de seguridad, de forma que la cinta de abdomen esté tensionada un máximo de 18 N.

En el resto de apartados de la normativa se indican aspectos técnicos imprescindibles para la correcta realización del ensayo, de forma que tengan validez. Algunos puntos hacen referencia a las condiciones que debe cumplir la barrera deformable o algunas partes del cuerpo del dummy. También se especifica la instrumentación necesaria para realizar el ensayo y de qué forma se deben realizar las mediciones.

En el punto **Requisitos**, se incluyen diversos parámetros y condiciones que se deben dar tras el ensayo, en el vehículo o en los dummies, para que el vehículo pueda ser considerado apto para su homologación. Los principales requisitos son los siguientes:

- ◆ La norma de referencia en el ensayo de comportamiento de la cabeza (HIC) no será superior a 1000, y la aceleración resultante de la cabeza no superará los 80g a lo largo de más de 3 ms.
- ◆ Las normas de referencia en el ensayo de lesión del cuello no superarán los valores de los indicados en la figura:

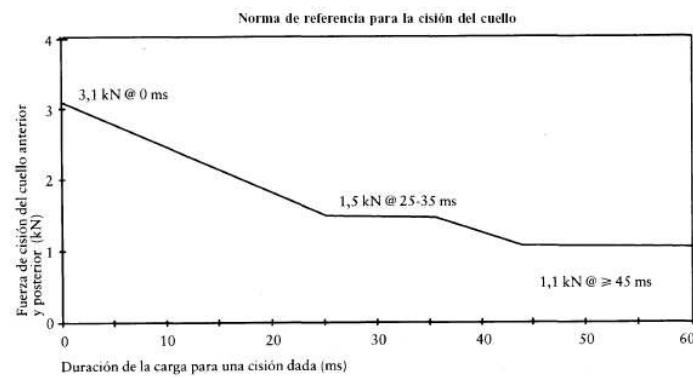


Figura 3.30 – Norma de referencia en el ensayo de lesión del cuello

- ♦ El movimiento de flexión del cuello alrededor del eje y no superará los 57 Nm en extensión.
- ♦ La norma de referencia en el ensayo de compresión del tórax no superará los 50 mm.
- ♦ La norma de referencia de viscosidad ($N \cdot V$) para el tórax no será superior a 1 m/s.
- ♦ La norma de referencia en el ensayo de fuerza del fémur no será superior a la norma de referencia en el ensayo de fuerza-tiempo que aparece en la figura:

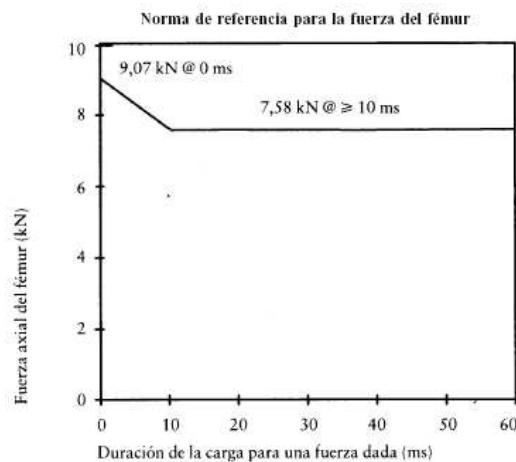


Figura 3.31 - Norma de referencia en el ensayo de fuerza del fémur

- ♦ La norma de referencia en el ensayo de fuerza de compresión de la tibia no superará los 8 KN.
- ♦ El índice de la tibia (IT), medido en la parte superior e inferior de cada tibia no será superior a 1,3 en cada una de las posiciones.
- ♦ El movimiento de las articulaciones de la rodilla no será superior a 15 mm.

- ◆ El desplazamiento residual del volante, medido en el centro de éste y en la parte superior de la columna de la dirección no será superior a 80 mm. hacia arriba en vertical ni a 100 mm. hacia atrás en horizontal.
- ◆ Durante el ensayo no deberá abrirse puerta alguna.
- ◆ Durante el ensayo no deberán bloquearse los sistemas de bloqueo de las puertas delanteras.
- ◆ Después de la colisión será posible, sin utilizar herramientas, a excepción de las necesarias para aguantar el peso del maniquí:
- ◆ Abrir al menos una de las puertas por fila de asiento, si la hay, y, si no la hay, mover los asientos o inclinar sus respaldos como fuera preciso para permitir la evacuación de todos los ocupantes; no obstante, esto sólo será aplicable a los vehículos que posean techo rígido.
- ◆ Liberar los maniquíes del sistema de retención, el cual deberá poder abrirse, en caso de estar bloqueado, aplicando una fuerza máxima de 60 N sobre el centro del mando de apertura.
- ◆ Extraer los maniquíes intactos del vehículo sin ajustar los asientos.
- ◆ Si se produjera una fuga continua de líquido de cualquier parte del circuito de alimentación de combustible después de la colisión, dicha fuga no deberá superar 5×10^{-4} kg/s.

3.2.3.5 EuroNCAP

El Programa Europeo de Valoración de Automóviles Nuevos (**European New Car Assessment Programme**) ha servido, como lo han hecho otros consorcios NCAP, para facilitar el acceso público a la información referente a la seguridad pasiva de los vehículos, cuando se produce una colisión. EuroNCAP realiza distintos ensayos de choque a los vehículos nuevos que salen al mercado.

La acción que realizan los colectivos NCAP en todo el mundo, está haciendo indirectamente que los vehículos sean cada vez más seguros. La normativa sobre homologación de vehículos ante una colisión, establece unos valores mínimos que deben cumplir los vehículos, con lo cual, los fabricantes sólo están obligados a cumplir con esos mínimos de seguridad. Antes de que apareciesen los colectivos NCAP, los fabricantes no tenían ningún incentivo para mejorar la seguridad. Sin

embargo, al darse a conocer los resultados de los ensayos, está haciendo que los fabricantes se esfuercen en construir vehículos cada vez más seguros. Este aumento de la seguridad será conocido por los posibles compradores y probablemente haga que se incrementen las ventas. De hecho, en la actualidad, en los anuncios publicitarios de los nuevos vehículos vendidos en Europa, se destaca la puntuación obtenida en los ensayos realizados por EuroNCAP [14].

EuroNCAP es un consorcio independiente que agrupa a distintas administraciones y asociaciones europeas que representan a más de 150 millones de consumidores. Nació en 1997, respaldado por cinco gobiernos europeos, y entre sus integrantes destacan el Departamento de transportes del Reino Unido, la Administración de Carreteras de Suecia, Holanda, Francia, Alemania, la Alianza Internacional de Turismo, la Federación Internacional de Automovilismo y la asociación Testing, que agrupa a 25 organizaciones de consumidores. En España, participan en EuroNCAP, el RACE (Real Automóvil Club de España), el RACC (Real Automóvil Club de Cataluña) y la OCU (Organización de Consumidores y Usuarios) [20].

Selección de los vehículos

Los ensayos de choque frontales intentan simular la colisión entre dos vehículos de masa y dimensiones similares, y por tanto, EuroNCAP realiza las pruebas comparando siempre vehículos de la misma categoría. No compara vehículos de categorías distintas, es decir, de masa y tamaño diferentes, puesto que dependiendo de la colisión, las respuestas de los vehículos pueden ser muy dispares.

Cuando se decide la categoría que será ensayada, posteriormente se elige qué vehículo ensayar. El vehículo es elegido por su popularidad o por ser representativo de la categoría. El vehículo elegido deberá contar con el equipamiento de seguridad de serie, y será comprado anónimamente.

Durante todo el proceso llevado por EuroNCAP, para ensayar un vehículo, los fabricantes están totalmente involucrados en el proceso. Los fabricantes del vehículo pueden subvencionar las pruebas de EuroNCAP, si un vehículo no ha sido elegido para pasar las pruebas. También pueden subvencionar la ampliación del equipamiento de seguridad del vehículo que será ensayado. Además, si tras haberse realizado el ensayo, el fabricante

modifica el vehículo, puede subvencionar un nuevo ensayo. En todos los casos, EuroNCAP publicará los resultados. Los fabricantes pueden asistir a la realización de todos los ensayos, teniendo la posibilidad de realizar cualquier observación, crítica, discusión, tanto de las pruebas como de los resultados, pudiéndose volver a realizar las pruebas si no satisfacen a los fabricantes, aunque los gastos de las nuevas pruebas correrán por parte del fabricante [14].

Ensayos

EuroNCAP evalúa la protección para los ocupantes del vehículo, es decir, la seguridad pasiva, sometiendo para ello al modelo de vehículo a una colisión frontal y a dos colisiones de tipo lateral. Además de estos ensayos, se realiza otro de protección del peatón frente al atropello[17].

ENSAYO FRONTAL

El vehículo se hace colisionar contra una barrera deformable descentrada (ODB), de aluminio con estructura de panal de abeja, a 64 km/h. El vehículo choca contra la barrera con sólo el 40% del frontal, en el lado del conductor. En los asientos delanteros son colocados dos maniquíes de ensayo de choque, Hybrid III, mientras que en las plazas traseras se colocan dos sillas de niños con sus respectivos dummies infantiles.

Este ensayo es similar al descrito por la Directiva 96/79/CE, salvo por la velocidad mayor, de 64 km/h, y por la introducción de los dummies infantiles, con los cuales se puede evaluar la protección de los niños en caso de colisión.



Figura 3.32 – Ensayo frontal EuroNCAP

ENSAYO LATERAL

El ensayo de colisión lateral es similar al descrito por la directiva europea 96/27/CE, salvo por la incorporación de los dummies infantiles en las plazas traseras.



Figura 3.33 – Ensayo lateral EuroNCAP

ENSAYO DE POSTE

Este ensayo puede definirse como una variante del ensayo lateral. Consiste en hacer chocar el vehículo con un poste rígido contra uno de sus laterales, en general, en el lado del conductor. La finalidad del ensayo es comprobar la seguridad que el vehículo ofrece al conductor, ya que al tratarse de un objeto rígido, la intrusión en el habitáculo es mayor. El choque del poste debe situarse a la altura de la cabeza del conductor.

El ensayo simula la colisión contra un pilar o árbol. Este tipo de colisión suele causar graves lesiones en cabeza y columna vertebral, por la violencia del choque y por la invasión del habitáculo que se produce.

La prueba se lleva a cabo montando el vehículo sobre un carro que impulsa el vehículo contra el poste, fuertemente anclado. El vehículo debe chocar perpendicularmente con el poste a la altura de la cabeza del conductor. La velocidad del vehículo en la colisión es de 29 ± 0.5 km/h. El poste empleado en la prueba es metálico y rígido, y tiene un diámetro de 254 ± 3 mm.

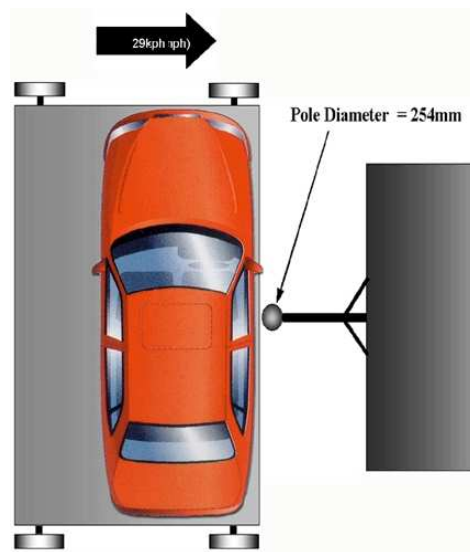


Figura 3.34 – Esquema del ensayo lateral de poste EuroNCAP



Figura 3.35 – Ensayo lateral de poste EuroNCAP

3.2.4 LOS CRASH TEST DUMMIES

Los nombres que pueden usarse para referirse a estos objetos son muy variados. Pueden ser llamados A.T.D., Anthropomorphic Test Device, es decir, aparato antropomórfico de prueba, o, Anthropomorphic Test Dummy, muñeco antropomórfico de prueba. En español pueden ser llamados, maniquí de prueba de choque o muñeco de prueba de choque. Aunque sin duda, el nombre más conocido y empleado en todo el mundo es el de crash test dummy.

La función de cualquier dummy de este tipo, es sustituir al ser humano en las pruebas a las que son sometidos los vehículos, es decir, los crash test. Además de sustituir a los ocupantes de los vehículos en las pruebas, deben tener un comportamiento similar al cuerpo del ocupante, para conocer la reacción que tendría éste en las pruebas de choque. Este comportamiento se basa en la biofidelidad, es decir, en poseer una serie de características físicas similares a las del cuerpo humano. Propiedades como las dimensiones, la masa, las estructura internas o la elasticidad de las distintas partes del cuerpo, deben ser lo más parecidas posible a las del cuerpo humano, para que la correlación, entre los resultados obtenidos con el dummy y los obtenidos con el cuerpo humano, sea la mejor posible [22]. Además de tener un comportamiento dinámico parecido a los del cuerpo humano, la utilidad de los dummies se basa en una serie de sensores distribuidos por todo el cuerpo, con los cuales, midiendo diferentes parámetros, poder analizar y obtener el daño que se acusaría en la persona.

En este apartado se describen los principales tipos de dummies que se utilizan actualmente, con especial atención al Hybrid III, que ha sido el utilizado en la simulación con WM2D (Working Model 2D).

3.2.4.1 TIPOS DE CRASH TEST DUMMIES

3.2.4.1.1 Hybrid III

3.2.4.1.1.1 Historia y Evolución del Hybrid III

Al igual que el uso del cinturón de seguridad en el automóvil, tuvo su origen el sector de la aviación, los dummies utilizados en los crash test de los automóviles, tuvieron su origen en la aviación [23] [24] [25].

En 1949, la empresa norteamericana Sierra Engineering, desarrolla el dummy “Sierra Sam”, de 90 kilos correspondiente al percentil 95%, para la realización de las pruebas de los asientos de eyección de los aviones, a través de un contrato con las Fuerzas Aéreas de Estados Unidos. Existe un informe de las Fuerza Aéreas que explica como algunos extraterrestres vistos en Nuevo México en la década de los cuarenta, eran en realidad dummies lanzados desde gran altura para observar su comportamiento en la caída.



Figura 3.36 – Dummy “Sam”, de la empresa Sierra Engineering

En 1956, la empresa norteamericana fabricante de automóviles, General Motors, GM, tras asistir a una conferencia de las Fuerzas Aéreas donde los investigadores militares explicaban los estudios realizados con los dummies en las pruebas de expulsión del asiento, empieza a considerar la utilización de los dummies en las pruebas de choque de los automóviles. Uno de estos investigadores militares, fue el Coronel John Paul Staap, pionero en la

creación e investigación de dummies. Durante sus investigaciones, actuó muchas veces como voluntario en las pruebas de deceleración con los asientos de expulsión, llegando a probar grandes deceleraciones viajando en un asiento a unos 1000 km/h.

En 1966, el Congreso de Estados Unidos, establece la Ley de Seguridad de los Vehículos con Motor, que regula la industria del automóvil y establece normas de seguridad para el automóvil. GM busca formas de mejorar los dummies y crea un método versátil para determinar el grado de riesgo de lesiones producido, midiendo las fuerzas de impacto sobre los dummies durante las pruebas de laboratorio.

Utilizando los mejores componentes de los dummies, VIP y Sierra Stan, de dos fabricantes, Alderson Research Labs (ARL) y Sierra Engineering Co, respectivamente, GM en 1971 desarrolla su primer dummy, llamado Hybrid I. Este dummy híbrido, llamado así por crearse combinando dos modelos diferentes, es usado internamente por GM para sus pruebas privadas.

Un año más tarde, GM mejora el Hybrid I y crea el Hybrid II. Este nuevo dummy cuenta con articulaciones mejor realizadas en los hombros, la columna y las rodillas, por lo que se obtienen mayor documentación que con el Hybrid I. GM comparte sus diseños con el resto de la industria del automóvil y los organismos reguladores federales. El Hybrid II representa una innovación en el desarrollo de los dummies gracias a su durabilidad, lo que permite que el mismo dummy se utilice repetidamente. El gobierno federal aprueba su homologación y lo convierte en el dummy estándar para la realización de pruebas de colisión frontal con sistemas de sujeción. A pesar de estas mejoras, los investigadores buscan un dummy con más características humanas e inmediatamente comienzan a trabajar en la tercera generación.

En 1973, GM asume un contrato del gobierno que solicita un dummy más refinado. Utilizando el Hybrid II como base, y con la ayuda de los miembros del comité de la Sociedad de Ingenieros del Automóvil (SAE) y los proveedores de dummies, los investigadores mejoraron la postura y le colocaron una nueva cabeza, además de agregar mejoras en las articulaciones. A este nuevo dummy se le da el nombre de GM ATD 502. Como curiosidad, GM acepta firmar el contrato con el gobierno, pero éste sólo paga un dólar, por deseo de GM.

En 1976 se continúa con la mejora del GM ATD 502, finalizando en la aparición del Hybrid III. De nuevo, GM comparte sus diseños con sus competidores y organismos del gobierno.

En 1977, sale a la venta el Hybrid III.

En 1980, el Dr. Harold J. Mertz, ingeniero del Centro de Operaciones de Seguridad y Control de Norteamérica de GM, recibe el Premio de Excelencia a la Seguridad en Ingeniería, otorgado por la Administración Nacional de Seguridad del Tráfico en Carreteras (NHTSA). Mertz, una autoridad internacionalmente reconocida en el área de creación de dummies y sistemas de sujeción para ocupantes de vehículos, dirigió el proyecto de desarrollo del dummy de GM.

En 1983, GM solicita a la NHTSA que utilice el Hybrid III como un dispositivo de prueba para el cumplimiento de la regulación gubernamental. GM también suministra, al sector y al gobierno, los objetivos que debe cumplir el dummy durante la realización de pruebas de seguridad, los cuales son cruciales para poder traducir la información suministrada por el Hybrid III en la mejoras de seguridad aplicables al mundo real. Tres años después, la NHTSA accede a la demanda de GM.

En 1990, GM solicita a la NHTSA que designe al Hybrid III como el único dispositivo de pruebas que cumple con los requisitos del gobierno.

En 1991, la Organización Internacional de Regulación, ISO, aprueba una resolución unánime en la que se reconoce la superioridad del dummy Hybrid III de GM. El Instituto de Seguros para la Seguridad en la Carreteras, IIHS, acepta esta resolución.

En 1997, la NHTSA declara al dummy Hybrid III como el único dispositivo para pruebas de impacto frontal oficial que cumple con las pruebas de sujeción de ocupantes. Este dummy reemplaza al Hybrid II de GM.

En 1998, el Hybrid III se convierte en el dispositivo oficial europeo para pruebas de sujeción contra impacto frontal.

3.2.4.1.1.2 Arquitectura del Hybrid III

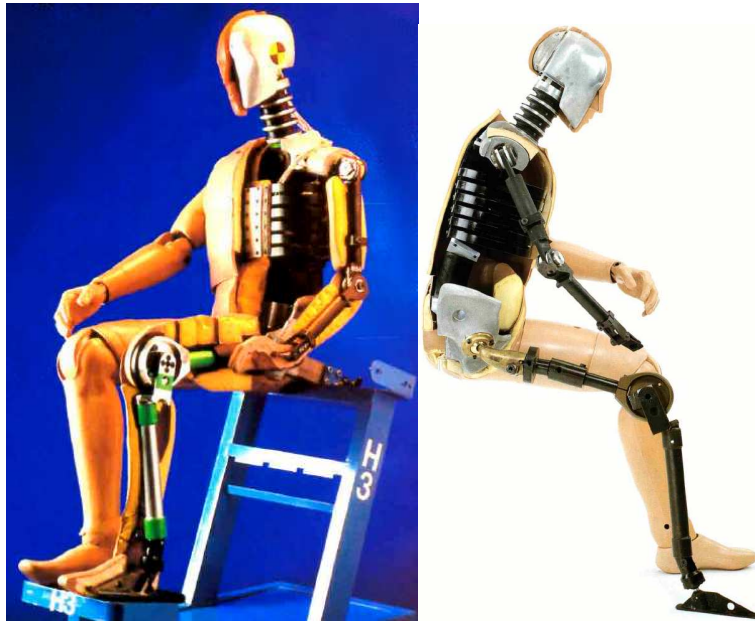


Figura 3.37 – Fisionomía del Hybrid III

El dummy Hybrid III, como puede verse en la figura anterior, consta básicamente de un esqueleto metálico, hecho de acero. Los huesos de las extremidades están constituidos con barras de acero cuyas dimensiones y formas, son parecidas a las de los huesos humanos. La cabeza está formada por una carcasa hueca de aluminio. La caja torácica está formada por una serie de costillas de acero que responden como un pecho humano ante el impacto. La zona del abdomen está rellena de una espuma de poliuretano expandido que simulan los distintos órganos internos.

El cuello y la espina lumbar, presentan un comportamiento similar al de los órganos humanos, gracias a la utilización de elementos elásticos, de goma, intercalados con elementos metálicos, de aluminio, y todos ellos unidos por un cable metálico. La parte blanda del cuerpo, como puede ser la piel o los músculos, está compuesta en vinilo y espuma sintética. Estos elementos están contruidos para poder ser desprendidos fácilmente del dummy, y facilitar las tareas de mantenimiento, reparación o calibración [22] [23] [24].

3.2.4.1.1.3 Distintas Versiones del Hybrid III


Del Hybrid III se han construido varias versiones con diferentes tamaños y pesos. Cada una de estas versiones corresponde con un percentil determinado. Existe un dummy masculino del percentil 50% y otro del percentil 95%. Además existe un dummy femenino del percentil 5%. Existe una serie dedicada a dummies infantiles, que representan a niños de tres, seis y diez años.

Un dummy de percentil 95%, representa a un individuo cuya masa y estatura es superada sólo por el 5 % de la población, es decir, se trata de un individuo de constitución fuerte. Sin embargo, un dummy de percentil 5%, representa a un individuo de constitución débil, ya que sólo el 5 % de la población tiene una masa y estatura menor.

El Hybrid de percentil 50% fue el primero que se construyó, a partir del cual se construyeron las otras versiones, y, representa al varón norteamericano de masa y estatura media.

Las distintas versiones de Hybrid III, son las siguientes[23][26]:

HYBRID III MASCULINO, PERCENTIL 50%



MASAS DEL CONJUNTO		DIMENSIONES EXTERNAS	
PARTE	Kg	DIMENSIÓN	cm
Cabeza	4.54	Circunferencia de Cabeza	59.7
Cuello	1.54	Anchura Cabeza	15.5
Torso Superior	17.19	Longitud Cabeza	20.3
Torso Inferior	23.04	Estatura Sentado Erguido	88.4
Brazos Superiores	3.99	Longitud desde Hombro a Codo	33.8
Brazos Inferiores y Manos	4.54	Longitud desde Codo a Muñeca	29.7
Piernas Superiores	11.97	Longitud desde Glúteo a Rodilla	59.2
Piernas Inferiores y Pies	11.34	Altura Rodilla	49.6
TOTAL	78.15		

Figura 3.38 – Hybrid III masculino, percentil 50%

HYBRID III MASCULINO, PERCENTIL 95%



MASAS DEL CONJUNTO

PARTE	Kg
Cabeza	4.94
Cuello	1.83
Torso Superior	22.58
Torso Inferior	30.30
Brazos Superiores	5.82
Brazos Inferiores y Manos	5.25
Piernas Superiores	18.42
Piernas Inferiores y Pies	14.49
TOTAL	101.15

DIMENSIONES EXTERNAS

DIMENSIÓN	cm
Circunferencia de Cabeza	58.4
Anchura Cabeza	15.5
Longitud Cabeza	20
Estatura Sentado Erguido	93.5
Longitud desde Hombro a Codo	35.8
Longitud desde Codo a final Dedos	47.8
Longitud desde Glúteo a Rodilla	63.2
Altura Rodilla	59.4

Figura 3.39 – Hybrid III masculino, percentil 95%

HYBRID III FEMENINO, PERCENTIL 5%



MASAS DEL CONJUNTO

PARTE	Kg
Cabeza	3.88
Cuello	0.908
Torso Superior	12.00
Torso Inferior	13.80
Brazos Superiores	2.36
Brazos Inferiores	1.80
Manos	0.56
Piernas Superiores	6.27
Piernas Inferiores	6.54
Pies	1.45
TOTAL	49.37

DIMENSIONES EXTERNAS

DIMENSIÓN	cm
Circunferencia de Cabeza	53.85
Anchura Cabeza	14.22
Largo Cabeza	18.3
Estatura Sentado Erguido	78.74
Longitud desde Hombro a Codo	28.7
Longitud desde Codo a Muñeca	25.15
Longitud desde Glúteo a Rodilla	53.34
Altura Rodilla	40.64

Figura 3.40 – Hybrid III femenino, percentil 5%

HYBRID III INFANTIL 3 AÑOS



MASAS DEL CONJUNTO

PARTE	Kg
Cabeza	2.72
Cuello	0.79
Torso Superior	7
Brazos Superiores	0.88
Brazos Inferiores y Manos	0.92
Piernas Superiores	2
Piernas Inferiores	1.22
Pies	0.62
TOTAL	16.17

DIMENSIONES EXTERNAS

DIMENSIÓN	cm
Circunferencia de Cabeza	50.8
Anchura Cabeza	13.59
Estatura Sentado Erguido	54.61
Longitud desde Glúteo a Rodilla	29.24
Altura Rodilla	24.92

Figura 3.41 – Hybrid III infantil, 3 años

HYBRID III INFANTIL 6 AÑOS



MASAS DEL CONJUNTO

PARTE	Kg
Cabeza	3.47
Cuello	0.54
Torso Superior	5.57
Torso Inferior	6.24
Brazos Superiores	0.96
Brazos Inferiores y Manos	1.24
Piernas Superiores	2.9
Piernas Inferiores y Pies	2.5
TOTAL	23.42

DIMENSIONES EXTERNAS

DIMENSIÓN	cm
Circunferencia de Cabeza	52.07
Anchura Cabeza	14.22
Estatura Sentado Erguido	63.5
Longitud desde Glúteo a Rodilla	35.31
Altura Rodilla	31.50

Figura 3.42 – Hybrid III infantil, 6 años

HYBRID III INFANTIL 10 AÑOS



MASAS DEL CONJUNTO

PARTE	Kg
Cabeza	3.73
Cuello	0.8
Torso Superior	8.14
Torso Inferior	8.71
Brazos Superiores	1.62
Brazos Inferiores	1.32
Manos	0.34
Piernas Superiores	5.36
Piernas Inferiores	4.46
Pies	0.82
TOTAL	35.2

DIMENSIONES EXTERNAS

DIMENSIÓN	cm
Circunferencia de Cabeza	53.85
Anchura Cabeza	14.22
Estatura Sentado Erguido	71.83
Longitud desde Glúteo a Rodilla	42.42
Altura Rodilla	38.1

Figura 3.43 – Hybrid III infantil, 10 años

3.2.4.1.1.4 Instrumentación Hybrid III

Como ya se ha dicho, la utilidad de los dummies de prueba, está basada en la biofidelidad que ofrece el cuerpo ante las pruebas de choque, con la cual puede conocerse el comportamiento que tendrá un cuerpo humano ante esas situaciones. Mediante esta biofidelidad se consigue conocer el comportamiento cualitativo del dummy ante una prueba.

El comportamiento cuantitativo de los dummies en un ensayo es posible conocerlo gracias a toda la instrumentación que incorporan. En el interior de los cuerpos, además de contar con el esqueleto metálico y algunos materiales de relleno, existe una gran cantidad de sensores o transductores distribuidos por distintas partes del cuerpo, con los cuales registrar distintos valores, de

fuerza, aceleración o desplazamiento, que muestran como se ven afectados los dummies durante la colisión. A partir de los datos recogidos por los sensores, y gracias a la biofidelidad, puede extrapolarse esta información para conocer las lesiones o daños que sufriría un ocupante humano en esa misma situación.

En el caso del dummy Hybrid III, al tratarse básicamente de un dummy de prueba de impacto frontal, los lugares de ubicación de los sensores y los parámetros que miden, son los apropiados para obtener la mayor información posible de este tipo de impacto. Cuando el dummy está indicado para la realización de otro tipo de prueba, los sensores y su ubicación pueden ser diferentes, para adecuarse a cada situación.

En la siguiente tabla aparece un resumen con algunos de los sensores utilizados en un dummy durante un ensayo. En concreto, se trata de un dummy Hybrid III masculino de percentil 50%. En la tabla se especifica la ubicación de los sensores, además del tipo de magnitud medida y el número de canales [23].

Instrumentación Hybrid III, percentil 50

LOCALIZACIÓN	DESCRIPCIÓN	CANALES
Cabeza	3 acelerómetros en conjunto	Ax, Ay, Az
Cuello	Célula de carga de 6 ejes, en cuello superior	Fx, Fy, Fz, Mx, My, Mz
	Célula de carga de 6 ejes, en cuello inferior	Fx, Fy, Fz, Mx, My, Mz
Clavícula	Célula de carga de 2 ejes	Fx, Fz
Húmero	Célula de carga de 4 ejes	Fx, Fy, Mx, My
Tórax	3 acelerómetros en conjunto, en pecho	Ax, Ay, Az
	Medidor desplazamiento, en pecho	Dx
	Célula de carga en costilla-columna vertebral	2x Fx por costilla (12 en total)
	Célula de carga de 5 ejes, en columna vertebral	Fx, Fy, Fz, Mx, My
Espina lumbar	Célula de carga de 3 ejes	Fx, Fz, My
Pelvis	3 acelerómetros en conjunto	Ax, Ay, Az
Fémur	Célula de carga	Fx
	o célula de carga de 6 ejes	Fx, Fy, Fz, Mx, My, Mz
Rodilla	Medidor desplazamiento	Dx
Pierna inferior	Célula de carga en rodilla	Fz
	Célula de carga de 2 ejes, en tibia superior	Mx, My
	Célula de carga de 3 ejes, en tibia inferior	Fy, Fz, Mx
Tobillo	Célula de carga de 5 ejes	Fx, Fy, Fz, Mx, My, Mz
Pie	Célula de carga	Fz

Tabla 3.2 – Sensores empleados en el Hybrid III

El Hybrid III es un dummy cuyas cualidades son óptimas para la realización de ensayos de choque frontales. Aunque podría usarse en otro tipo de ensayo, su instrumentación y su comportamiento general no permiten extraer tanta información válida como ocurre en el caso del ensayo frontal. Por esta razón, a medida que se van

desarrollando distintos tipos de ensayos de choque, también se desarrollan los dummies adecuados para cada prueba.

Los siguientes, son algunos de los distintos tipos de dummies utilizados en los diversos tipos de ensayo [17] [24] [27].

3.2.4.1.2 SID

El SID (Side Impact Dummy) o maniquí de impacto lateral, como su propio nombre indica, es un dummy diseñado para la realización de los choques laterales. Su especial diseño lo hace adecuado para mostrar los efectos de las colisiones laterales en las costillas, la columna vertebral y en los órganos internos, como el hígado o el bazo. El SID fue desarrollado a finales de los años 70 por la Administración Nacional de Seguridad del Tráfico en Carretera de Estados Unidos (NHTSA). Es el dummy usado en los ensayos de homologación en Estados Unidos.

En Europa se creó el EuroSID, cuyas características son similares a las del SID americano. Es el dummy utilizado en Europa para realizar los ensayos de homologación de los automóviles nuevos.

Existe otro dummy de ensayo lateral, el BioSID. Es un diseño, de General Motors, más avanzado que el del SID y EuroSID, pero no es usado para los ensayos oficiales de homologación.

Tanto el SID, EuroSID y el BioSID representan un individuo masculino de percentil 50%. Son fácilmente reconocibles entre otros dummies puesto que sus brazos sólo están completos hasta el codo.

La información que facilitan estos dummies es principalmente, la aceleración de la columna vertebral y las costillas, además de la compresión en la caja torácica. Esta última medida es tomada como referencia para conocer posibles daños de los órganos internos.



Figura 3.44 – SID (Side Impact Dummy)

3.2.4.1.3 BioRID

Se trata de dummy de ensayo de impacto trasero, con el cual estudiar las lesiones de menor importancia causadas en el cuello, producidas en este tipo de colisiones. Este problema, conocido como **latigazo cervical**, suele darse en choques traseros a baja velocidad. Su diseño permite conocer con gran detalle el movimiento relativo de la cabeza y el torso. Para ello cuenta con una columna vertebral compuesta por 24 vértebras, similares a las reales, que permiten reproducir las distintas curvaturas de la espalda. De esta forma, su comportamiento, ante la colisión trasera, es muy similar al de la espalda humana, y por tanto, ayudan a comprender las lesiones producidas en el latigazo cervical.

Fue desarrollado a finales de los años 90, entre otras entidades, por los fabricantes Volvo y Saab. El BioRID, que representa a un individuo masculino de percentil 50%, ha ayudado a mejorar elementos de seguridad pasiva como el reposacabezas o los asientos del automóvil.

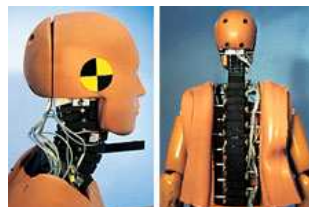


Figura 3.45 – BioRID

3.2.4.1.4 THOR

THOR, Test device for Human Occupant Restraint, o dispositivo de prueba de la restricción del ocupante humano. Se trata del maniquí de ensayo frontal más avanzado construido hasta el momento. El THOR supera a su predecesor, Hybrid III, en aspectos como la biofidelidad y en la instrumentación. Su columna vertebral y la pelvis permite variar la posición sentada del dummy. Los sensores permiten transmitir información sobre las fuerzas generadas en la cara del dummy, con lo cual, es posible saber por primera vez las posibles lesiones que sufrirá la cara de la persona en las colisiones. Además de estos nuevos sensores, el THOR cuenta con mayor cantidad de sensores y más sensibilidad que los disponibles en el Hybrid III. Su tamaño equivale a un individuo masculino de percentil 50%.

THOR se ha construido bajo la dirección de la NHTSA, y ha sido sometido a un proceso de validación internacional en el que han participado fabricantes de vehículos y centros de investigación americanos, japoneses y europeos.

Aunque por ahora no ha sido adoptado como maniquí de prueba en ningún procedimiento de homologación de vehículos, parece que pronto se convertirá en el sustituto del Hybrid III.

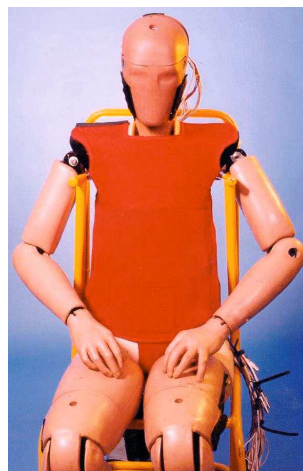


Figura 3.46 – THOR, Test device for Human Occupant Restraint

4. SIMULACIÓN DEL ENSAYO MEDIANTE WORKING MODEL 2D

4.1 OTROS PROGRAMAS DE SIMULACIÓN

En el proceso de mejora de la seguridad de los automóviles participan diversas entidades, como son los propios fabricantes de vehículos, fabricantes de equipamiento auxiliar, laboratorios de investigación y universidades. Todas ellas, de forma más o menos intensa emplean, cada día más, métodos de simulación por ordenador en la realización de sus trabajos de investigación.

En las simulaciones similares a las realizadas en este proyecto, es decir, modelos de crash test dummies, se emplean dos tipos de modelos, los realizados mediante multicuerpos y los realizados con elementos finitos. Estos últimos ofrecen mayor precisión en los resultados, aunque también necesitan periodos de cálculo más elevados.

De los diversos programas utilizados habitualmente en las simulaciones de la industria del automóvil, algunos de los más empleados son: PAM-CRASH, PAM-SAFE, MADYMO y LS-DYNA. Los modelos realizados en uno de estos programas, pueden ser importados a los otros y trabajar con ellos. Los dos últimos programas mencionados, parecen ser los más usados para realizar modelos de dummies, como el desarrollado en este proyecto [23] [28] [30] [31].

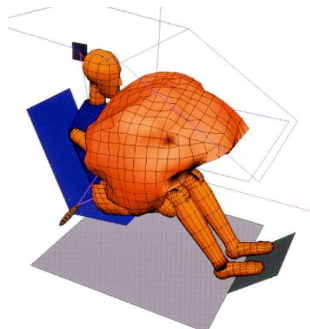


Figura 4.1 – Modelo realizado con PAM-SAFE

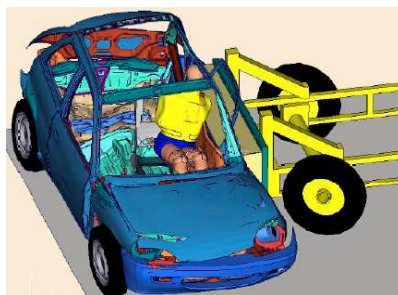


Figura 4.2 – Ensayos realizados por TNO con MADYMO. El dummy mostrado se trata de un modelo de elementos finitos

A continuación se incluyen algunos ejemplos de la utilización de estos programas empleados para realizar modelos de dummies.

La empresa fabricante de dummies, FTSS, ha desarrollado un modelo del dummy Hybrid III, que ha validado a través de una serie de ensayos realizados en su laboratorio de pruebas. Alguno de estos ensayos de validación es similar al realizado en este proyecto. Este modelo, de elementos finitos, ha sido realizado con LS-DYNA.



Figura 4.3 – Modelo de elementos finitos realizado por FTSS con LS-DYNA

El ensayo tomado como referencia para ser reproducido en este proyecto, desarrollado por ARA, también ha sido realizado con LS-DYNA.

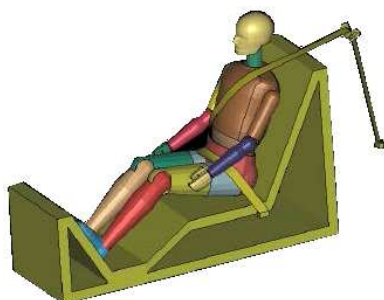


Figura 4.4– Modelo de elementos finitos realizado por ARA con LS-DYNA

La Fundación CIDAUT, realiza simulaciones basadas en ensayos reales desarrollados en sus laboratorios. En este caso se desconoce el programa específico utilizado en estos modelos.

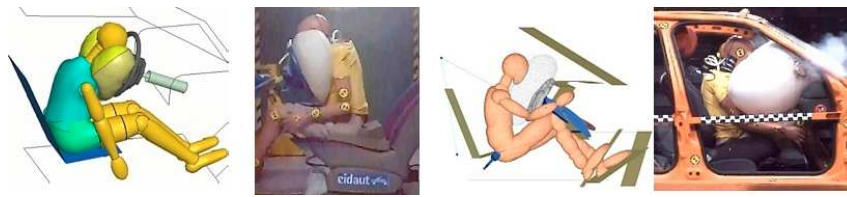


Figura 4.5 – Modelos realizados por CIDAUT

El siguiente modelo está realizado con MADYMO, y está incluido en el proyecto ADRIA, financiado por la Comisión Europea, cuyo fin es mejorar el nivel de protección de los ocupantes de los vehículos en las colisiones frontales.

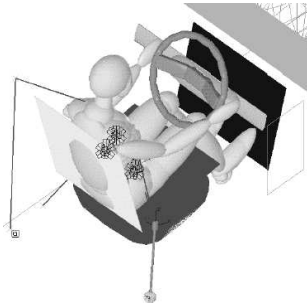


Figura 4.6 – Modelo multicuerpo incluido en el proyecto ADRIA

4.2 METODOLOGÍA

La metodología para la realización de las simulaciones se puede dividir en los siguientes pasos:

- ◆ Elección del ensayo
- ◆ Información del dummy
- ◆ Construcción del dummy
- ◆ Construcción del asiento
- ◆ Diseño de la simulación

4.2.1 ELECCIÓN DEL ENSAYO

En la realización de este proyecto, puesto que no se dispone de ningún ensayo de referencia con el cual realizar el modelo informático, ha sido necesario aprovechar la información facilitada por la bibliografía. La información referente al dummy, también ha sido obtenida de los diferentes fabricantes y entidades, ya que no se ha dispuesto de ningún dummy real sobre el que realizar mediciones.

El ensayo buscado debía presentar varias características o requisitos para ser elegido y reproducido:

- ♦ Debía tratarse de un ensayo de un elemento de seguridad pasiva, probado en un asiento junto con el dummy.
- ♦ El dummy utilizado en el ensayo sería el Hybrid III de percentil 50%. Este dummy fue elegido por ser el más conocido y utilizado de todos los dummies.
- ♦ Dificultad del ensayo media, para garantizar que el programa empleado, Working Model 2D (WM2D), tuviese capacidad para realizar las simulaciones.
- ♦ El ensayo tenía que estar lo más detallado posible, incluyendo información de la aceleración del asiento y detalles de la geometría del asiento que permitiera reproducirlo. Y sobre todo, que se incluyese el comportamiento del dummy durante el ensayo, ya que sería la información con la que se contrastará la validez de las simulaciones realizadas.

Teniendo en cuenta todos estos factores, fue elegido un ensayo desarrollado por la empresa Estadounidense, Investigación Aplicada Asociados S.A (**A**pplyed **R**esearch **A**ssociates Inc.) [29]. Este ensayo ha sido patrocinado por la Administración Federal de Carreteras, con la intención de obtener un modelo de ocupante realizado mediante el paquete informático de elementos finitos, LS-DYNA. Posteriormente este modelo de ocupante puede ser empleado en diversas utilidades tanto para investigación en la seguridad del automóvil, como en el transporte ferroviario. El ensayo elegido ha sido empleado para la validación de su modelo, al compararse con la respuesta durante el mismo ensayo del dummy real.

El ensayo escogido consiste en un dummy colocado sobre un asiento o trineo, sujetado mediante el cinturón de seguridad. El asiento es sometido a un pulso de aceleración, que simula una colisión frontal a una velocidad de 54,72 km/h (34 mph).

Además de cumplir con todos los requisitos exigidos, en el ensayo tomado como referencia, aparece también la respuesta del dummy real junto con el resultado de la simulación. Como se puede ver, aunque el modelo informático desarrollado es considerado válido, se aprecian ciertas diferencias de comportamiento respecto al dummy real. Este aspecto evidencia la dificultad que existe en ocasiones para reproducir cualquier elemento mediante una simulación. Por tanto, en toda simulación realizada, es necesario conocer cuales son los datos más significativos de un ensayo, para poder comparar esos datos de la simulación con los del ensayo real, y de esta forma considerar la validez de un modelo.

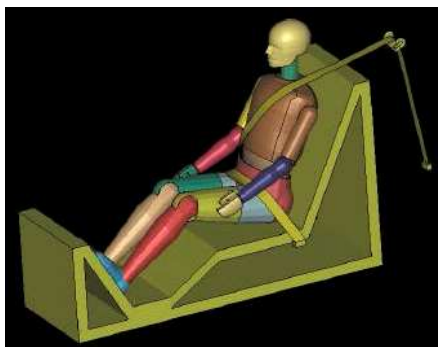


Figura 4.7 – Modelo desarrollado por ARA, elaborado con LS-DYNA

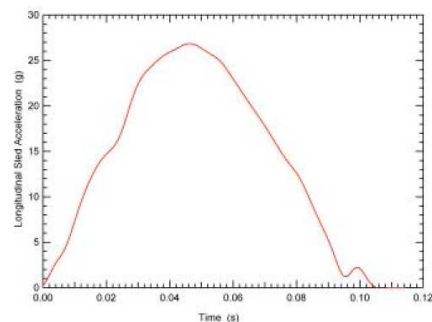


Figura 4.8 – Aceleración aplicada en el ensayo realizado por ARA

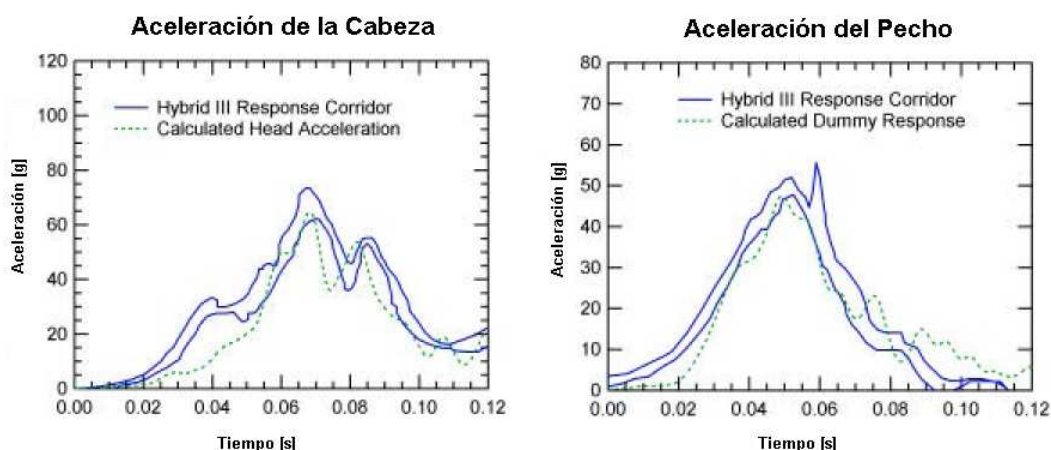


Figura 4.9 – Comportamiento del dummy durante el ensayo realizado por ARA. La curva azul corresponde con la respuesta del dummy real, mientras que la línea verde muestra la respuesta del modelo simulado.

4.2.2 INFORMACIÓN DEL DUMMY

En el ensayo de referencia desarrollado por ARA no se especifica ninguna información acerca del dummy Hybrid III, y por tanto, ésta tuvo que ser obtenida a través de otros medios.

La información sobre el Hybrid III que puede ser consultada abiertamente es muy limitada, sobre todo, en cuanto a su geometría. Esto no ocurre con otro tipo de dummy como el THOR, cuyos planos están disponibles gratuitamente para todo el público [32].

Fabricantes del Hybrid III, como son FTSS (First Technology Safety Systems) [23] o Denton ATD [26], ofrecen información general sobre sus dummies. Tan sólo especifican las masas de las distintas partes del cuerpo y valores de algunas dimensiones externas. Estas dimensiones son escasas y no muestran como son medidas.

La información facilitada por los fabricantes sobre la distribución de masas, es suficiente para poder ser usada en la construcción del modelo, pero los detalles de su geometría no.

Para completar la información sobre la geometría del Hybrid III, se recurrió al Código de Regulaciones Federales de Estados Unidos, en concreto a la Parte 572, Subparte E, donde se muestran de una forma más detallada las dimensiones externas del Hybrid III [33].

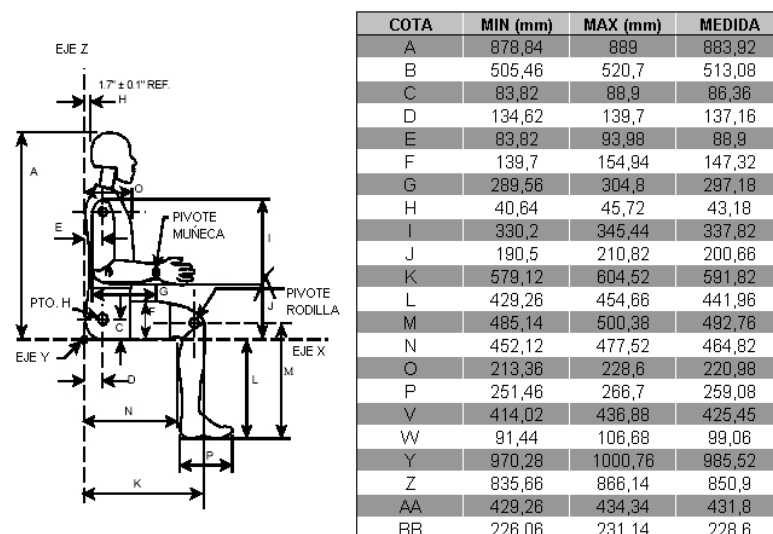


Figura 4.10 – Dimensiones externas del dummy Hybrid III, de percentil 50%

4.2.3 CONSTRUCCIÓN DEL DUMMY

Al tratarse WM2D de un programa de simulación que trabaja sólo en dos dimensiones, el modelo realizado tanto del asiento como del dummy, están limitados a ser contruidos en un solo plano. Por el tipo de ensayo elegido, la mejor opción fue realizar el dummy, mostrándolo desde su perfil sagital.

Aunque las dimensiones externas obtenidas del Código de Regulaciones Federales son válidas para la elaboración del modelo, no permiten reproducir las proporciones y el aspecto exterior del Hybrid III. Para completar la información de las cotas exteriores del maniquí, y de esta forma poder dibujarlo con un aspecto más real, se empleó una técnica utilizada en varias aplicaciones de Biomecánica. Se trata de un procedimiento, descrito en [34], con el cual es posible medir distancias en el cuerpo humano utilizando una fotografía.

Empleando una fotografía del Hybrid III, donde se muestra el cuerpo entero de la forma más perpendicular y alejada posible para evitar distorsiones en las dimensiones, es factible dibujar un maniquí de apariencia y proporciones cercanas a las reales. Además, esta técnica facilita la localización y señalización de las diferentes articulaciones del dummy.

Para dibujar el dummy basta con seguir los contornos del cuerpo sobre la fotografía, indicando también los puntos de articulación. Esta tarea se realiza empleando el programa informático de dibujo AutoCAD 14, porque permite crear los dibujos en un formato espacial para intercambio de dibujo entre aplicaciones, que WM2D reconoce y que le permite trabajar con ellos. WM2D dispone de unas herramientas de dibujo, pero, debido a la facilidad de uso, unido a las mayores posibilidades de modificación y opciones de dibujo, hacen prácticamente obligatorio el empleo de AutoCAD como programa de apoyo para WM2D.

Empleando las herramientas de AutoCAD, se traza el contorno del dummy dibujando directamente sobre la fotografía. Cada parte del cuerpo del dummy debe dibujarse considerándola como si estuviese aislada del resto del cuerpo, aunque para ello haya que dibujar las zonas ocultas tras otras partes del cuerpo. Puesto que estas zonas del cuerpo no son visibles posteriormente en el modelo final, al quedar también ocultas, esa zona del contorno se puede dibujar de forma aproximada. Además de los

contornos aproximados del dummy, hay que marcar, empleando puntos, las distintas articulaciones.

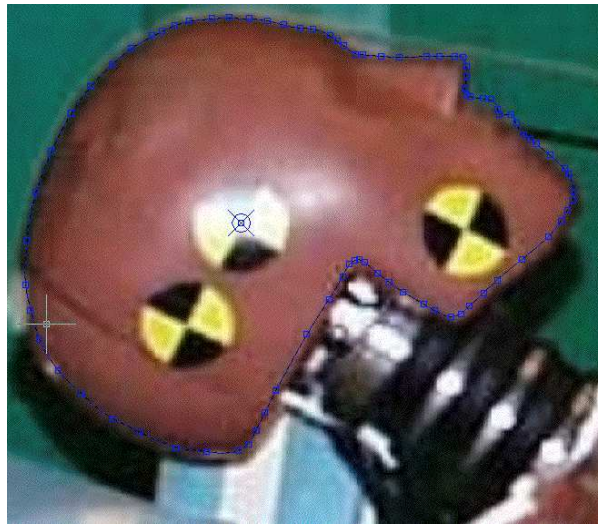


Figura 4.11 – Proceso de trazado del dummy en AutoCAD

El siguiente paso es escalar el dibujo, para conseguir el tamaño real del Hybrid III a partir del que se tiene en la fotografía.

A continuación se exporta este dibujo a WM2D. En ocasiones, cuando se importa un dibujo consistente en un solo polígono a WM2D, éste aparece formado por una serie de diferentes polígonos superpuestos, cuyo contorno exterior sí muestra el polígono deseado. Esta circunstancia puede provocar problemas posteriores, ya que WM2D considera cada polígono superpuesto como cuerpos independientes, y no como un solo cuerpo.

El otro gran inconveniente, comprobado, que presenta WM2D, es que aunque se importe el dibujo correctamente y sea transformado en un cuerpo, WM2D no permite trabajar directamente con él para realizar las simulaciones. En todas las pruebas que se han realizado empleando los cuerpos directamente importados, se han detectado excesivos tiempos de cálculo de la simulación, inestabilidades y errores del programa.

Una solución para solventar este problema, es emplear las simples herramientas de dibujo disponibles en WM2D, para volver a trazar todos los cuerpos importados. La tarea se facilita gracias a que los contornos de los cuerpos importados, son reconocidos por WM2D, de forma que se fuerza al cursor a seguir las líneas.

El siguiente paso en la construcción del dummy, es unir los segmentos a través de sus articulaciones marcadas con puntos. Cuando son seleccionados dos puntos, pertenecientes a cuerpos diferentes, WM2D permite unir ambos cuerpos por esos dos puntos, transformándolos en una articulación simple o de clavija.

WM2D dispone de varios tipos de articulaciones: articulaciones simples o de clavija, articulaciones en forma de muelle rotatorio y articulaciones en forma de amortiguador rotatorio. Dependiendo del tipo de articulación colocada, el comportamiento del dummy, variará. Para introducir una articulación diferente a la de clavija, creada en un principio, puede realizarse fácilmente sustituyendo la articulación por una de otro tipo.

Cuando el cuerpo ya se ha acoplado, puede modificarse su apariencia variando el plano de superposición de las diferente partes del cuerpo. De esta forma se consigue que el modelo del dummy adquiera la apariencia de ser visto desde uno de sus laterales. Para poder realizarse la superposición de cuerpos no conectados directamente, es necesario indicar al programa que no existan colisiones entre las diferentes partes del cuerpo.

El último paso es limitar el movimiento de sus articulaciones. Esta información sólo parece viable si se dispone de un dummy real sobre el que realizar las mediciones. Por esta razón, se consideró como posible criterio aceptable, limitar las articulaciones aproximadamente según el rango de movimiento humano [35], ya que la utilidad de los dummies está basada en su biofidelidad. Para limitar los movimientos, se emplean separadores o topes, disponibles como elementos de WM2D.

Una de las partes más complicadas de reproducir, son las zonas elásticas presentes en el cuello y espina lumbar del dummy. Estas partes están constituidas por elementos elásticos, de goma, intercalados entre elementos metálicos, lo que les hace tener unos movimientos similares a los del cuerpo humano, y a la vez, diferentes a los de otras partes del dummy.

En varias pruebas sencillas realizadas para reproducir el comportamiento de estas zonas elásticas, se observó como en un primer momento parecen comportarse adecuadamente, pero cuando son insertadas con el resto del cuerpo, el programa WM2D no es capaz de soportar el mayor proceso de cálculo, apareciendo inestabilidades y errores. Este funcionamiento del programa, obliga a prescindir de los

elementos elásticos y sustituirlos por elementos rígidos, que en lugar de doblarse girarán en torno a unas articulaciones “imaginarias”.

4.2.4 CONSTRUCCIÓN DEL ASIENTO O TRINEO

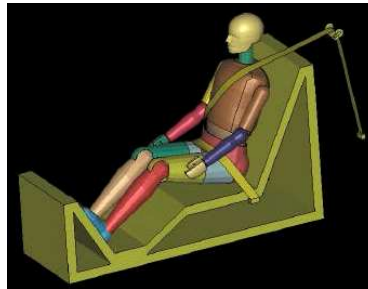


Figura 4.12 - Modelo desarrollado por ARA, elaborado con LS-DYNA

Según la información proporcionada por la *figura 4.5*, el gráfico muestra el asiento en perspectiva. Para conseguir la vista del lateral del asiento, de nuevo empleando AutoCAD, se señalan tanto los vértices como las aristas del asiento, sobre el propio gráfico. Realizando diferentes giros de estos elementos, se consigue modificar la orientación de los ejes del asiento, con lo que puede obtenerse la vista lateral deseada, donde se muestra la geometría aproximada del trineo.

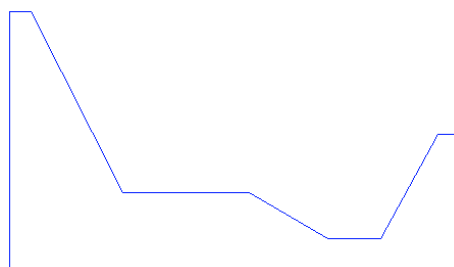


Figura 4.13 – Modelo de trineo empleado en el modelo

El tamaño exacto del asiento no se conoce a priori, pero empleando como referencia el dummy, ya con su tamaño correcto, puede conseguirse el tamaño aproximado del trineo que permita al dummy un buen acoplamiento.

Una vez dibujado y escalado el asiento en AutoCAD, se exporta a WM2D del mismo modo que se realiza todo el proceso seguido en la construcción del dummy. Es decir, tras ser importado el dibujo del asiento en WM2D, es necesario volver a dibujarlo para poder ser usado en las simulaciones.

4.2.5 DISEÑO DE LA SIMULACIÓN

Una vez insertados en WM2D el dummy y el asiento, se incorporan los otros dispositivos necesarios para proceder a la simulación. Uno de estos elementos es el encargado de mover el asiento de la forma adecuada. El resto, son elementos que restringen determinados movimientos tanto del asiento como del dummy.

En concreto, estos elementos son los siguientes:

- ♦ **Una guía corredera horizontal, con unión rígida.** Este tipo de guía corredera permite mover el asiento horizontalmente, impidiendo que posea otra componente de la aceleración distinta a la horizontal. Al tratarse de la unión rígida, el asiento se mantiene horizontalmente en todo momento, impidiendo su giro. El movimiento horizontal del asiento se podría conseguir si se hace deslizar el asiento sobre una plataforma plana, pero no se aseguraría que ante cualquier fuerza, se produjera un giro del asiento respecto a la horizontal.
- ♦ **Actuador.** Es el elemento que proporciona movimiento al asiento. El pulso de aceleración empleado en el ensayo de referencia, puede ser reproducido por este elemento, ya que permite aplicar valores de: fuerza, aceleración, velocidad o desplazamiento.
- ♦ **Cuerda.** Este elemento se utiliza para simular el efecto que tendría el cinturón de seguridad. Puesto que el cinturón de seguridad empleado en el ensayo de referencia, es uno de tres puntos de anclaje, se emplean dos cuerdas. Estas cuerdas retienen al dummy por la cadera y por la zona alta del tronco, como lo harían la banda de cadera y la banda de hombro, respectivamente, en el caso de un cinturón de seguridad real.

4.2.5.1 PARÁMETROS DE SIMULACIÓN

Existen diferentes parámetros que pueden ser modificados, y elementos que pueden ser incorporados al modelo, con los cuales se consiguen variar los resultados en la simulación. Sin embargo, en este apartado se indican los parámetros que no serán variados y que serán comunes para todas las simulaciones o pruebas. Es decir, los siguientes, son los parámetros que determinan el **ensayo base**.

El resto de variables, que no son especificadas en este apartado, pueden ser modificadas en las simulaciones para conseguir diferentes respuestas del modelo.

Parámetros del Dummy

Las masas de las distintas partes del cuerpo del dummy son valores que no serán cambiados en ningún momento, ya que corresponde es una cualidad propia del dummy. En la *tabla 4.1*, aparece la distribución de las masas de las distintas partes del cuerpo. Esta información corresponde con la facilitada por el fabricante FTSS [23], donde detalla las masas empleadas en su modelo informático de Hybrid III de percentil 50%.

MASAS DEL CONJUNTO

PARTE	Kg
Cabeza	4.5
Cuello	1.4
Torso Superior	16.8
Torso Inferior	22.4
Brazo Superior	2
Brazos Inferiores	1.7
Mano	0.6
Pierna Superior	6
Pierna Inferior	4.3
Pie más zapato	1.7
TOTAL	77.7

Tabla 4.1 – Masas del modelo de dummy

El valor del coeficiente elástico de los cuerpos, se fija en cero, para evitar el rebote de los cuerpos al chocar con el asiento.

El resto de los valores de las diferentes propiedades, se dejan por defecto o se introducen valores intermedios que serán modificados posteriormente, si es necesario, durante la simulación.

Parámetros del Asiento

El único parámetro fijo, es el del coeficiente elástico, que será cero, para evitar el rebote de los cuerpos al chocar con éste.

Parámetros del Actuador

Ya que la aceleración del asiento viene impuesta por el ensayo de referencia, ésta no puede ser modificada en ningún momento, para que de esta forma, los resultados de las simulaciones puedan ser comparados, con el fin de evaluar la validez del modelo.

Los parámetros que posee un actuador son: el tipo de funcionamiento del actuador, el valor y el tiempo de funcionamiento. Además de no poder modificarse en ningún momento, estos parámetros deben ser los adecuados para poder reproducir el pulso de aceleración del ensayo de referencia, mostrado abajo.

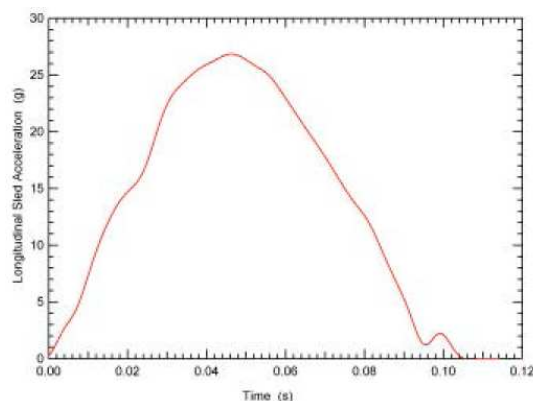


Figura 4.14 - Aceleración aplicada en el ensayo realizado por ARA, el ensayo de referencia

En la *figura 4.14*, puede observarse como el pulso de aceleración tiene una forma muy similar a la de una parábola. Esta singularidad se aprovechó para poder reproducir el ensayo con mayor precisión.

Conociendo la ecuación que rige el pulso de aceleración, puede ser introducida como el parámetro del actuador. Para extraer la ecuación de una

parábola, cuya forma y valores sean cercanos a los del pulso de aceleración, se empleó el programa informático Microsoft Excel. Mediante la toma de datos manual del pulso de aceleración, se obtuvo un gráfico muy aproximado a la aceleración del ensayo de referencia. Posteriormente, se calculó una línea de tendencia en forma de parábola de la curva creada a partir de los valores tomados manualmente. La ecuación de esa línea de tendencia es la que se emplea como valor del actuador.

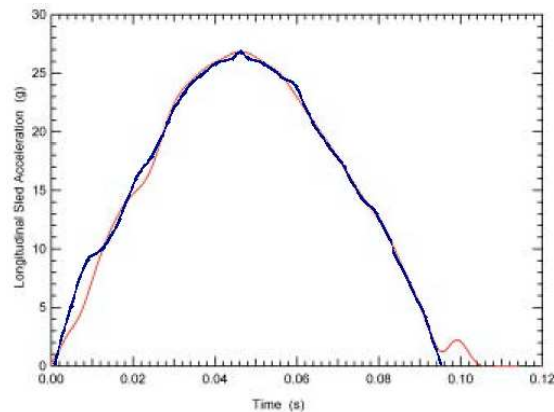


Figura 4.15 – Comparación del pulso de aceleración tomado manualmente, con el pulso original

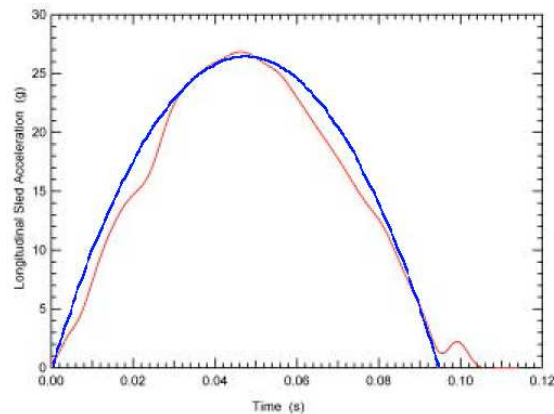


Figura 4.16 – Comparación del pulso de aceleración empleado en el modelo, con el pulso original

$$y = -116586x^2 + 11054x + 0,2109 \quad [\text{Ec. 4.1}]$$

Como resultado, se obtuvo el pulso de aceleración en forma de parábola, Ec. 4.1, que mueve al asiento, cuyos valores son muy próximos en todo momento con los del pulso original, y por tanto, los resultados de la simulación pueden ser comparables.

Puesto que en el ensayo de referencia, la aceleración dura un tiempo determinado, en el modelo también se limita la duración de la aceleración. Aproximadamente, la aceleración en el pulso original es aplicada durante 96 milésimas de segundo. Para conseguir esto, simplemente hay que especificar que el actuador esté activo hasta que el tiempo de simulación sea igual a 96 milésimas, ya que la aceleración del asiento comienza desde tiempo cero, al igual que toda la simulación.

El resultado de todo este proceso descrito, queda reflejado en la siguiente figura. Se puede apreciar todos los elementos necesarios para realizar las simulaciones.

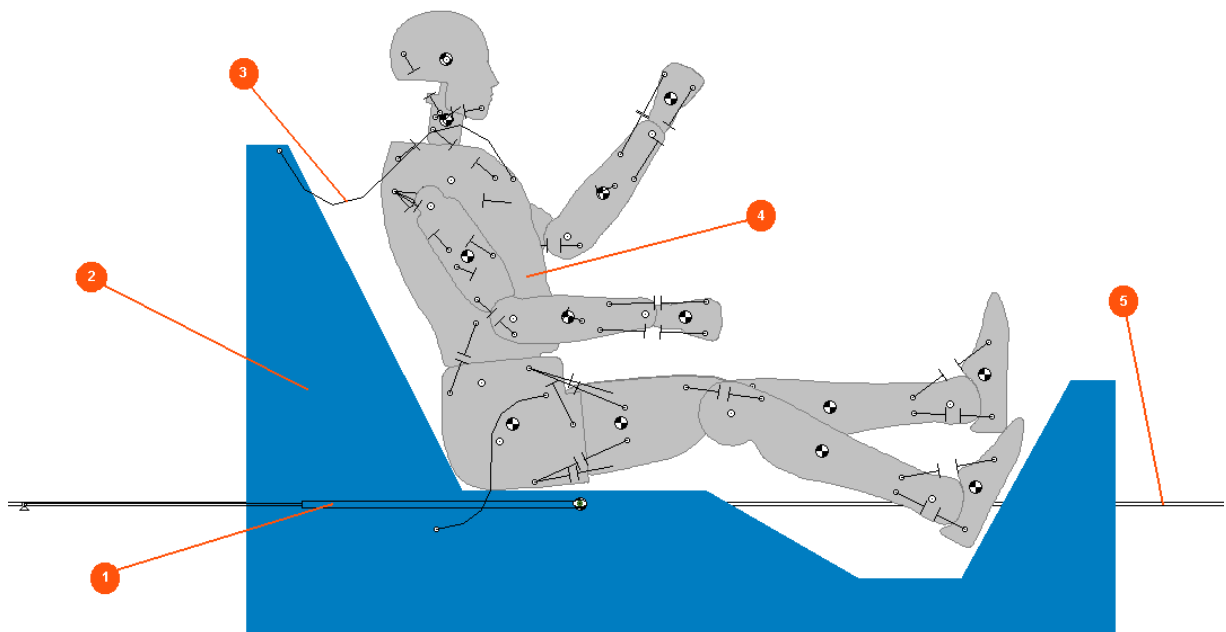


Figura 4.17 – Elementos componentes del ensayo.1) Actuador 2) Asiento 3)Sogas 4)Dummy 5)Guía

4.3 MODELOS PROPUESTOS

Durante la búsqueda de información sobre el dummy Hybrid III, se encontraron diferentes fotografías con las cuales reproducir tanto el aspecto exterior como las proporciones de las distintas partes del cuerpo del dummy. Estas fotografías presentan al dummy en diferentes posiciones. Además, el nivel de detalle y nitidez varia, con lo que los modelos realizados pueden presentar diferencias entre ellos. Por este motivo, antes de optimizar una simulación para intentar conseguir unos resultados satisfactorios, es necesario comprobar la respuesta de diferentes modelos de dummies, ya que de esta forma los resultados no están condicionados a un único modelo construido. Realizando diferentes modelos de dummy es posible comparar sus respectivas respuestas, y de este modo elegir el que mejores resultados ofrezca. Una vez seleccionado el dummy correcto, se optimizará la simulación hasta conseguir que este modelo realizado con WM2D se asemeje lo máximo posible al ensayo tomado desde un principio como referencia.

Se realizarán tres modelos diferentes de Hybrid III, cuyas proporciones y aspectos difieren entre ellos.

En los siguientes apartados se presentan los tres modelos diferentes de Hybrid III realizados. La información mostrada para cada modelo de dummy está estructurada de la siguiente forma.

En primer lugar se muestra la fotografía original, a partir de la cual se crea cada dummy.

Posteriormente se visualiza el modelo, una vez dibujado en formato de AutoCAD. Aparecen indicadas las principales cotas exteriores del dummy, gracias a las cuales es posible observar como éste, una vez escalado, presenta el tamaño adecuado. Con el fin de poder ser comparadas las dimensiones del modelo con las del dummy real, se indica entre paréntesis, la diferencia entre el valor de una cota en el modelo y el valor medio de esa misma cota en el dummy real.

En una figura posterior se muestra el modelo en formato WM2D. Se puede ver la superposición de las partes del cuerpo, y como se consigue dar el

aspecto de una vista lateral al dummy. También se muestran los separadores empleados para limitar el movimiento de las distintas partes del cuerpo, mencionados en el apartado anterior, 4.2. Los únicos elementos que no aparecen en el modelo hecho en WM2D, son las diversas articulaciones. A pesar de esto, en los modelos realizados tanto en AutoCAD como en WM2D, es posible observar una serie de puntos distribuidos a lo largo de todo el cuerpo, que corresponden con los lugares donde irán ubicadas las articulaciones.

Para diferenciar cada modelo, serán nombrados empleando la siguiente nomenclatura:

- ♦ Dummy Modelo 1
- ♦ Dummy Modelo 2
- ♦ Dummy Modelo 3

El número utilizado en cada modelo, hace también referencia al orden cronológico en el cual han sido realizados, siendo el número uno, el primero en construirse, y el número tres, el último.

4.3.1 DUMMY MODELO 1

El *Modelo 1*, ha sido dibujado sobre la base de la fotografía mostrada en la *figura 4.18*. Esta figura corresponde con uno de los ensayos realizados por la Administración Federal de Aviación de Estados Unidos (FAA, Federal Aviation Administration) en colaboración con TNO Automotive [31] [36], donde el Hybrid III es empleado para valorar la seguridad de los asientos utilizados en los helicópteros.



Figura 4.18 – Hybrid III modificado por la FAA, empleado como referencia para construir el Dummy Modelo 1

A partir de la fotografía anterior y tomándola como referencia, se construyó el modelo, empleando AutoCAD. En la siguiente figura aparece el *Modelo 1* acotado, donde se muestran las dimensiones principales. Se aprecian las diferencias de cada dimensión con respecto a las del dummy real, y como éstas difieren en pocos milímetros.

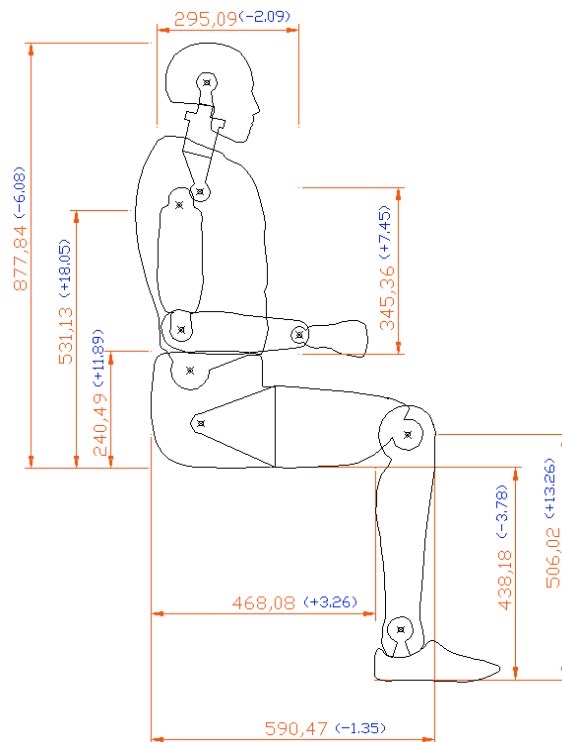


Figura 4.19 – Dimensiones externas del Dummy Modelo 1

Por último, en la *figura 4.20* se muestra el *Modelo 1* en formato de WM2D. Los únicos elementos que no aparecen son las ya mencionadas articulaciones. En su lugar, aparecen los puntos donde irán situadas.

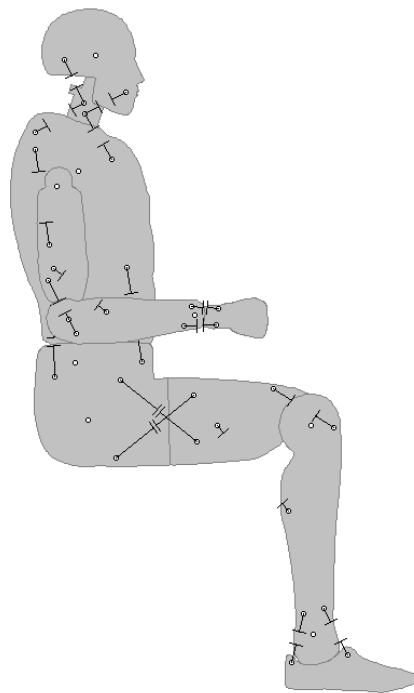


Figura 4.20 – Dummy Modelo 1 construido en formato WM2D

4.3.1.1 OBSERVACIONES SOBRE EL DUMMY MODELO 1

Una vez construido el modelo y realizado con él algunas pruebas, se comprobó como en realidad la imagen tomada no mostraba un Hybrid III estándar, sino que era un Hybrid III modificado. En concreto, el *Modelo 1* se obtuvo a partir de una imagen del FAA Hybrid III. Se trata de un Hybrid III nacido de la cooperación entre la FAA, junto con el Instituto Civil de AeroMedicina (CAMI, Civil Aeromedical Institute) y la empresa Denton ATD, con el cual realizan la certificación de los asientos en las aeronaves [26] [36].

A pesar de esto, las modificaciones están centradas principalmente en sus componentes interiores, con lo cual, el aspecto exterior solamente se ve modificado en la cubierta del tronco, puesto que debe acoplarse a los nuevos elementos interiores. En las siguientes figuras se muestra el Hybrid III y el FAA Hybrid III, para apreciar las diferencias exteriores.

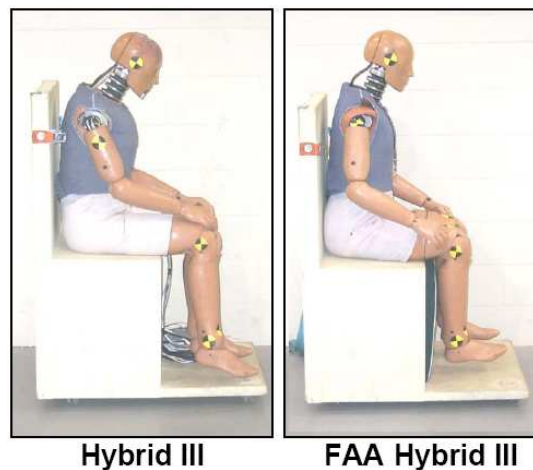


Figura 4.21 – Hybrid III frente al FAA Hybrid III

Como puede verse en la *figura 4.19*, aunque exteriormente existen diferencias, el modelo realizado, muestra unas dimensiones muy próximas al valor medio de las cotas del dummy.

Las articulaciones del dummy se han colocado tomando como referencia las marcas situadas sobre el dummy y orificios de montaje, que pueden verse en la *figura 4.18*.

Puesto que el movimiento del cuello y de la espina lumbar no puede ser reproducidos por la imposibilidad de incorporar elementos deformables, se tomaron también articulaciones sobre las que rotan estos elementos.

4.3.2 DUMMY MODELO 2

Para solventar las diferencias que presenta el *Modelo 1* con el Hybrid III estándar, se construyó este nuevo *Modelo 2*. Puesto que el FAA Hybrid, sólo se difiere exteriormente en el tronco con el Hybrid III, en el *Modelo 2* se modificó únicamente este elemento. También se elevó la posición de la cabeza para conseguir una apariencia más parecida a la del Hybrid III. Este aumento en la altura de la cabeza no repercutió significativamente en las dimensiones del dummy.

Los cambios hechos sobre el *Modelo 1*, que dan como resultado el *Modelo 2*, se aprecian en la figura siguiente, donde se pueden ver el nuevo aspecto y las dimensiones externas.

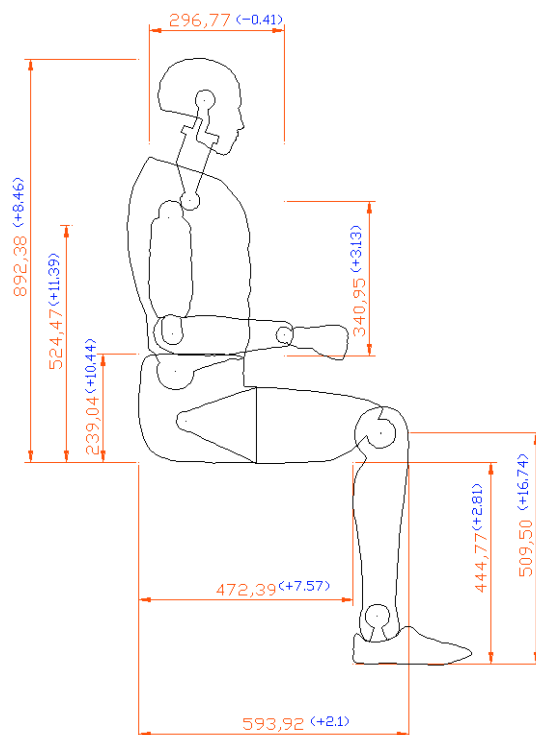


Figura 4.22 - Dimensiones externas del Dummy Modelo 2

El modelo en formato de WM2D aparece en la siguiente forma.

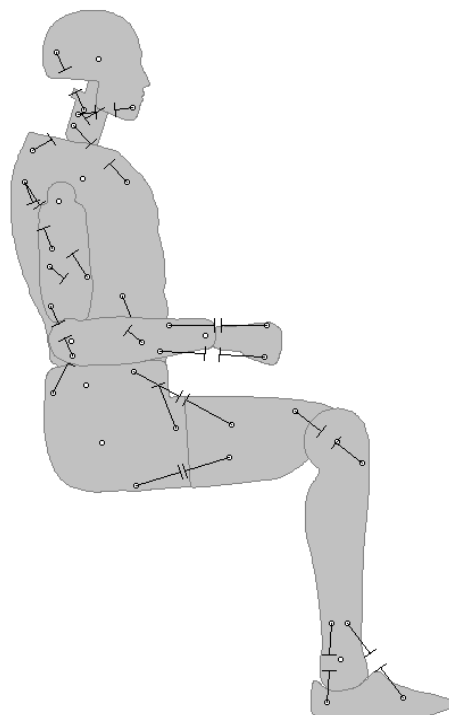


Figura 4.23 - Dummy Modelo 2 construido en formato WM2D

4.3.2.1 OBSERVACIONES SOBRE EL DUMMY MODELO 2

Todas las observaciones indicadas sobre el *Modelo 1*, pueden ser consideradas para este *Modelo 2*.

De nuevo, la diferencia entre las medidas del Hybrid III y las obtenidas con este modelo son despreciables, puesto que esas cotas están indicadas en milímetros. Se observan mínimas diferencias entre las cotas comunes del *Modelo 1* y el *Modelo 2*. Esto puede ser debido a variaciones a la hora de tomar los puntos de referencia empleados para las mediciones.

4.3.3 DUMMY MODELO 3

Para contrastar los anteriores modelos, basados en una única imagen, se construyó un tercer modelo nuevo, denominado *Modelo 3*.

En la realización de este *Modelo 3* se empleó una fotografía obtenida del Deutsches Museum Bonn [37].

La particularidad de la imagen permite conocer detalles acerca de los componentes internos del Hybrid III, así como de sus articulaciones, y en general, de su construcción.



Figura 4.24 – Hybrid III empleado como referencia para construir el Dummy Modelo 1

A partir de esta fotografía se obtiene el *Modelo 3*, mostrado en la figura siguiente, realizado en formato AutoCAD.

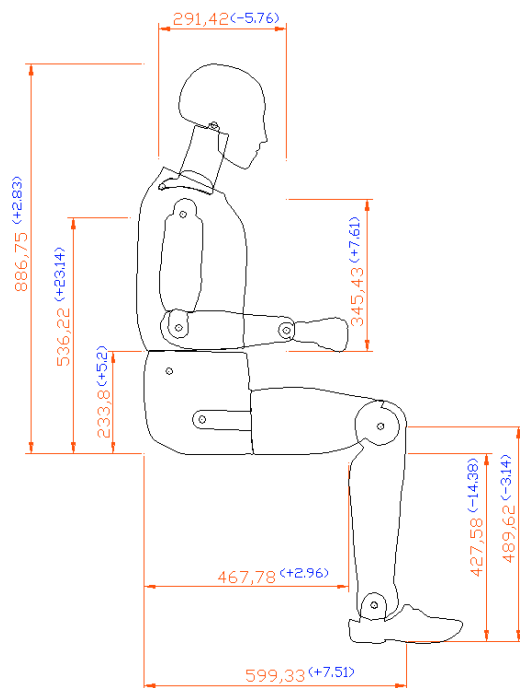


Figura 4.25 - Dimensiones externas del Dummy Modelo 3

El aspecto del *Modelo 3* en formato de WM2D, puede verse en la siguiente figura.

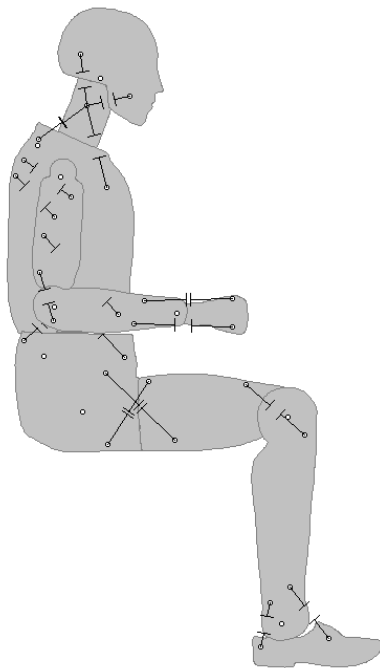


Figura 4.26 - Dummy Modelo 3 construido en formato WM2D

4.3.3.1 OBSERVACIONES SOBRE EL DUMMY MODELO 3

Los niveles de detalle y nitidez de cada fotografía de referencia causa la diferencia entre el *Modelo 3* y los otros dos. Otro aspecto que repercute en las diferencias entre los modelos es que algunas de las partes del dummy, como son el tronco y las piernas, poseen una cubierta desmontable para poder acceder fácilmente a los componentes internos. Estas cubiertas o pieles emplean sistemas de cierre que producen, en algunos casos, un peor ajuste.

La otra diferencia de este modelo respecto a los otros, es la ubicación de algunas de sus articulaciones. En la *figura 4.27*, pueden observarse los elementos elásticos, como son el cuello y, sobre todo, la espina lumbar [36]. La parte deformable del cuello está anclada a un soporte, el cual está fijado a una zona rígida a la altura de los hombros del dummy. Este acoplamiento está realizado mediante una unión que permite un cierto movimiento de rotación, como puede verse en la figura siguiente. Por este motivo, la nueva articulación para el cuello ha sido colocada en ese punto.

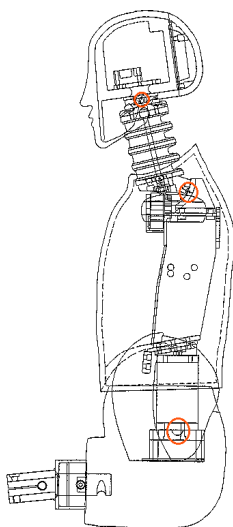


Figura 4.27 – Detalle del FAA Hybrid III. Están señalados los puntos donde se sitúan las articulaciones del Dummy Modelo 3

Como se puede ver claramente, existen diferencias entre los tres modelos. Sin embargo, sus dimensiones exteriores difieren en pocos milímetros. Para comprobar que, aunque las apariencias varían entre ellos, las proporciones y tamaños no difieren en exceso, se incluye la figura siguiente, donde los tres modelos son superpuestos, aproximadamente, en la misma postura.

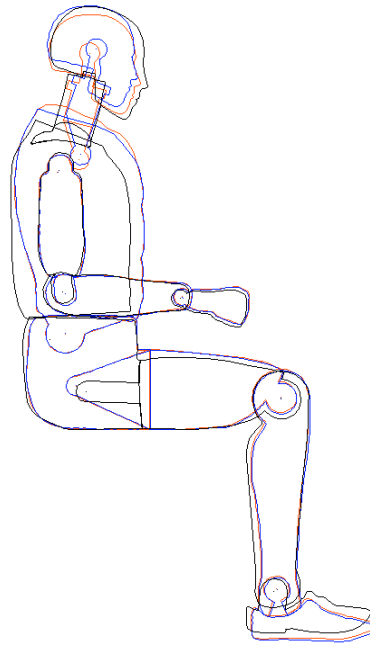


Figura 4.28 – Superposición de los tres modelos construidos.
En rojo, el Modelo 1; en azul, el Modelo 2; en negro, el Modelo 3

La finalidad por la cual se han realizado tres modelos diferentes, es para poder comparar las respuestas de varios dummies, y de esta forma no limitarse a aceptar el comportamiento de uno solo. Tras haber realizado diversas pruebas con estos tres modelos, se ha llegado a la conclusión, que los factores determinantes en el comportamiento de los modelos realizados, son precisamente, los factores comunes a los tres, es decir, su geometría y su masa. El aspecto exterior puede hacer variar sus respectivos comportamientos, pero estos tienen variaciones despreciables. Por este motivo, una vez realizados los tres modelos, se decidió no construir otro más, ya que la única mejora que podría conseguirse, sería referente al aspecto exterior y no a lo realmente importante, es decir, el comportamiento ofrecido.

4.4 RESULTADOS Y ELECCIÓN DE LA SIMULACIÓN

Empleando los tres modelos contruidos, realizando pruebas con ellos y comparando sus resultados, se decide qué modelo será empleado para optimizar la simulación. El modelo optimizado servirá para validar el modelo completo de ensayo desarrollado en este proyecto, con el fin de cumplir uno de los objetivos.

En este apartado se indica el procedimiento empleado en la elección del modelo de Hybrid III, así como el modelo finalmente elegido. Puesto que el ensayo o experimento ya ha sido fijado mediante los distintos parámetros, incluidos en el punto 4.1, el único elemento que aún no se ha elegido es el modelo de dummy a emplear. La elección se basa en la comparación entre los resultados ofrecidos por los modelos, con el fin de elegir el comportamiento que más similitudes presente con el comportamiento de referencia.

Empleando los tres modelos de dummies contruidos, es posible conseguir un número total mayor de modelos, desarrollando diferentes versiones de cada uno de ellos. Las versiones que se pueden conseguir de los diferentes modelos son casi ilimitadas, ya que basta con cambiar, suprimir o incorporar nuevos elementos. Sin embargo, la única característica diferenciadora de cada versión, será el tipo de articulación incorporada. Utilizando este criterio, se posibilita crear un número limitado de modelos, con los cuales sea posible realizar comparaciones fácilmente y sin emplear un tiempo excesivo. Por este motivo, y teniendo en cuenta que WM2D dispone de tres tipos de articulaciones diferentes, se conseguirán nueve modelos. Cada modelo de dummy se equipa con un solo tipo de articulación.

Después de realizar las simulaciones de los nueve modelos, se evaluarán los valores obtenidos y será entonces cuando se elija el modelo, y su versión correspondiente, que será empleado en la optimización definitiva de la simulación.

Debido a la necesidad de evaluar y comparar los comportamientos de los nueve modelos, los ensayos tienen que ser lo más homogéneos posible. Para garantizar la igualdad en las condiciones de los ensayos, se crea un ensayo tipo, que debe presentar estos requisitos:

- ♦ **Experimento.** Es el descrito en el apartado 4.2.5.1, denominado **como ensayo base**, sin ningún tipo de cambio en los elementos utilizados o en sus variables.
- ♦ **Colocación del dummy.** Se emplea una plantilla para situar todos los modelos en una misma posición antes del ensayo.
- ♦ **Elementos de retención.** Empleando la misma plantilla, se colocan los elementos de retención en los mismos puntos aproximados en los diferentes modelos. De este modo, también se consigue una misma longitud en los elementos de retención. La elasticidad de estos elementos se fija en cero para todos los casos.
- ♦ **Parámetros de las articulaciones.** Las articulaciones de tipo muelle y amortiguador rotatorio, poseen ciertos parámetros de configuración. En estos casos, se mantienen los valores que el programa fija por defecto. Esta decisión se debe a la intención de conseguir los modelos más simples posibles de cada una de las versiones.
- ♦ **Coeficientes.** Existen diferentes coeficientes que pueden ser modificados, como son los elásticos o de rozamiento. Se toma un valor arbitrario para mantener la igualdad en las pruebas, pero una vez elegido un modelo, estos podrán ser cambiados en el proceso de optimización.
- ♦ **Precisión.** En este caso, la elección de estos valores se basa en la experiencia conseguida durante todas las pruebas realizadas con el programa WM2D.

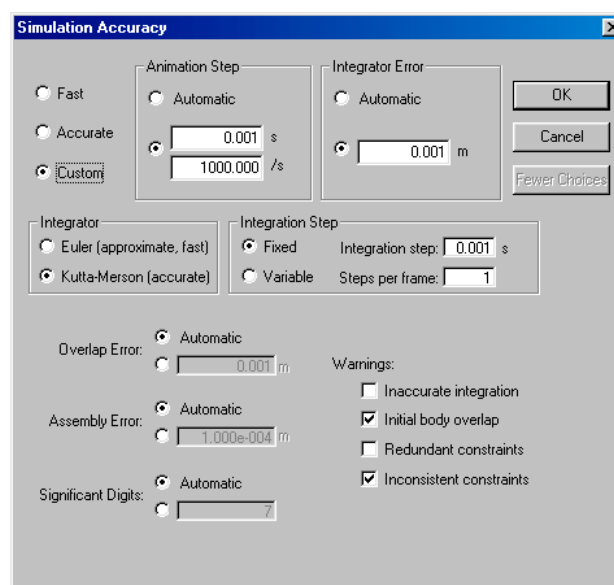


Figura 4.29 – Parámetros de precisión

4.4.1 RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES

En este apartado se recogen los resultados de las nueve pruebas realizadas con los diferentes modelos de dummies. Para cada uno de los modelos, se incluye una imagen del ensayo, así como el detalle de los datos de su comportamiento, que serán los utilizados para valorar su semejanza con el ensayo de referencia.

La lista siguiente corresponde con los modelos ensayados. Los términos clavija, muelle y amortiguador, especifican el tipo de las articulaciones empleadas en cada modelo. Por ejemplo, *Modelo 1 Clavija*, corresponde con el dummy *Modelo 1* cuyas articulaciones son de tipo clavija o simple.

Modelo 1 Clavija	Modelo 2 Clavija	Modelo 3 Clavija
Modelo 1 Muelle	Modelo 2 Muelle	Modelo 3 Muelle
Modelo 1 Amortiguador	Modelo 2 Amortiguador	Modelo 3 Amortiguador

4.4.1.1 MODELO 1

4.4.1.1.1 Modelo 1 Clavija

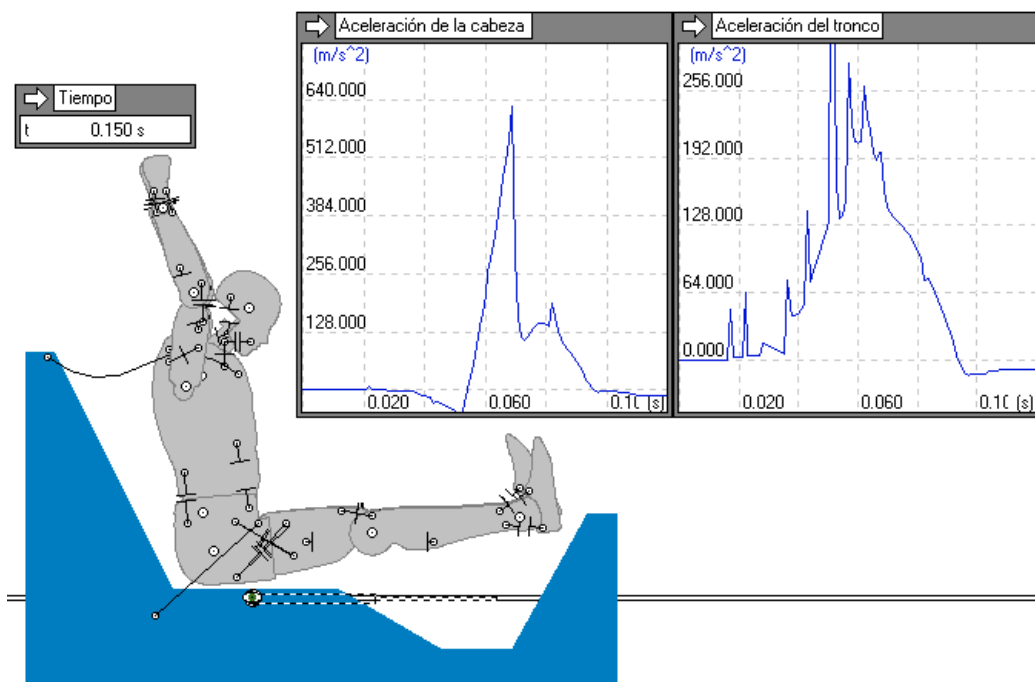


Figura 4.30 – Modelo 1 Clavija

4.4.1.1.2 Modelo 1 Muelle

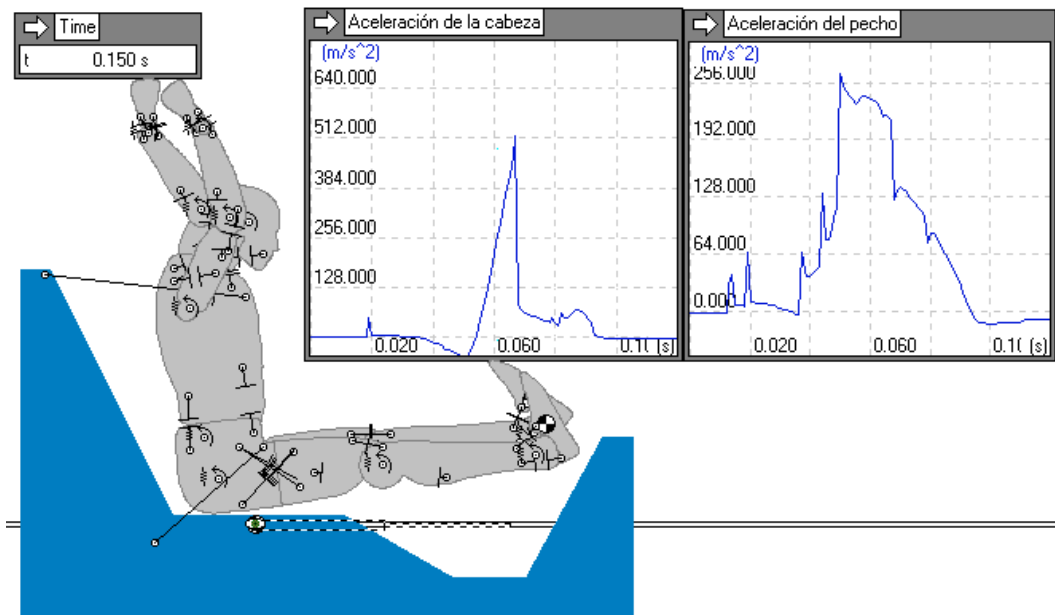


Figura 4.31 – Modelo 1 Muelle

4.4.1.1.3 Modelo 1 Amortiguador

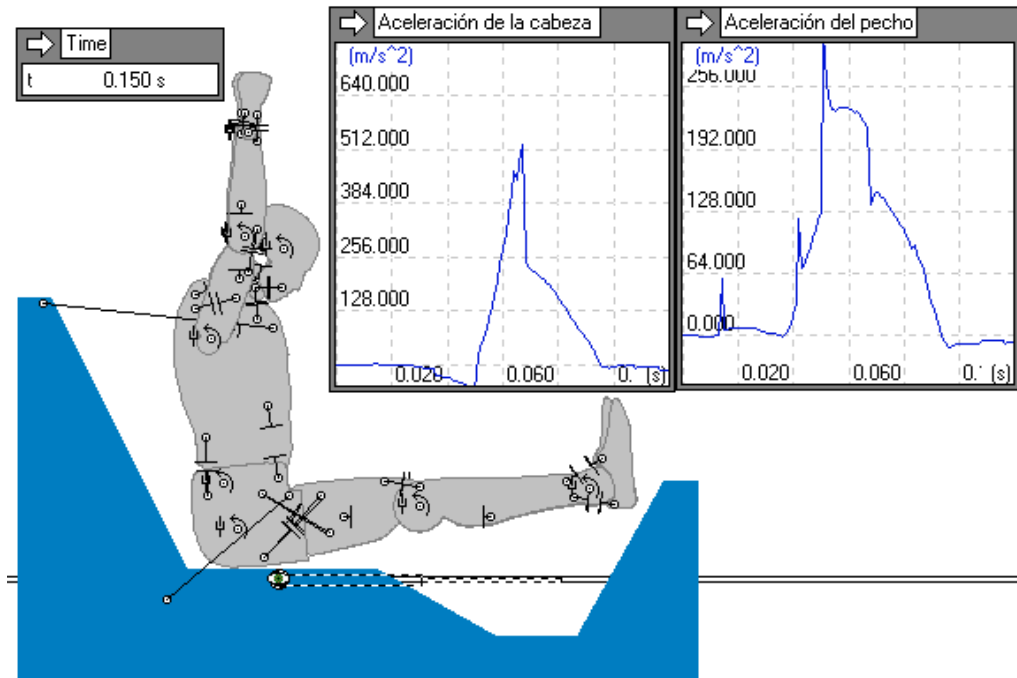


Figura 4.32 – Modelo 1 Amortiguador

4.4.1.2 MODELO 2

4.4.1.2.1 Modelo 2 Clavija

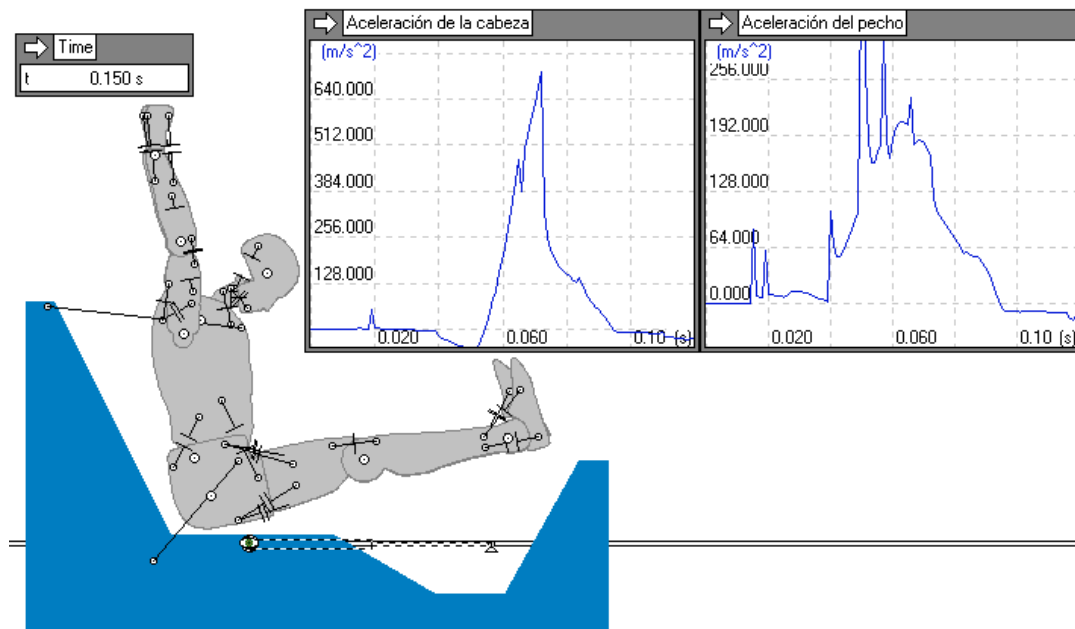


Figura 4.33 – Modelo 2 Clavija

4.4.1.2.2 Modelo 2 Muelle

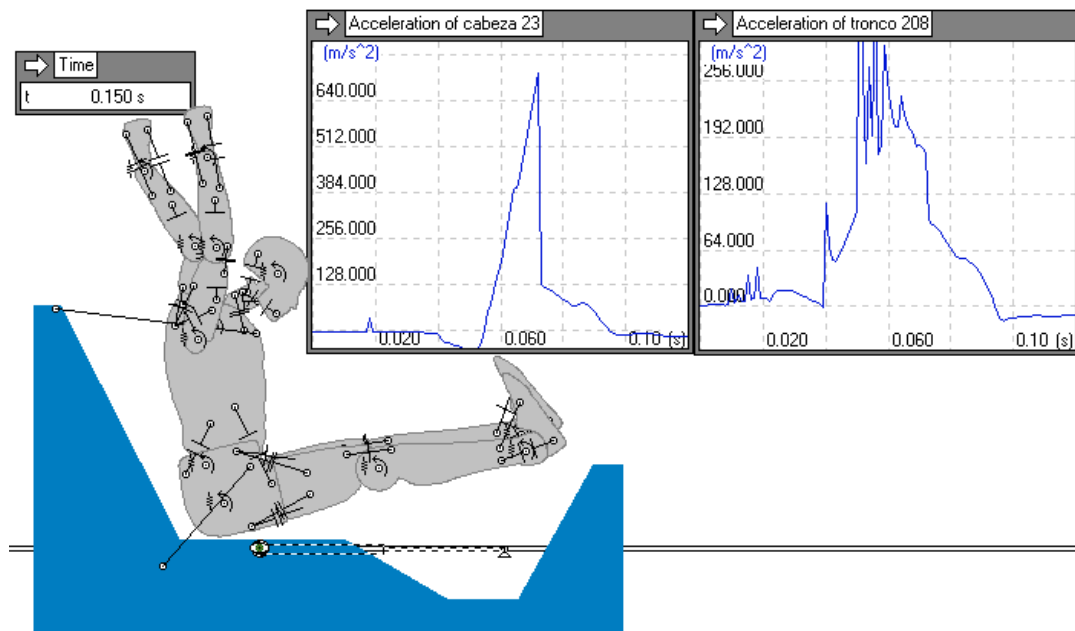


Figura 4.34 – Modelo 2 Muelle

4.4.1.2.3 Modelo 2 Amortiguador

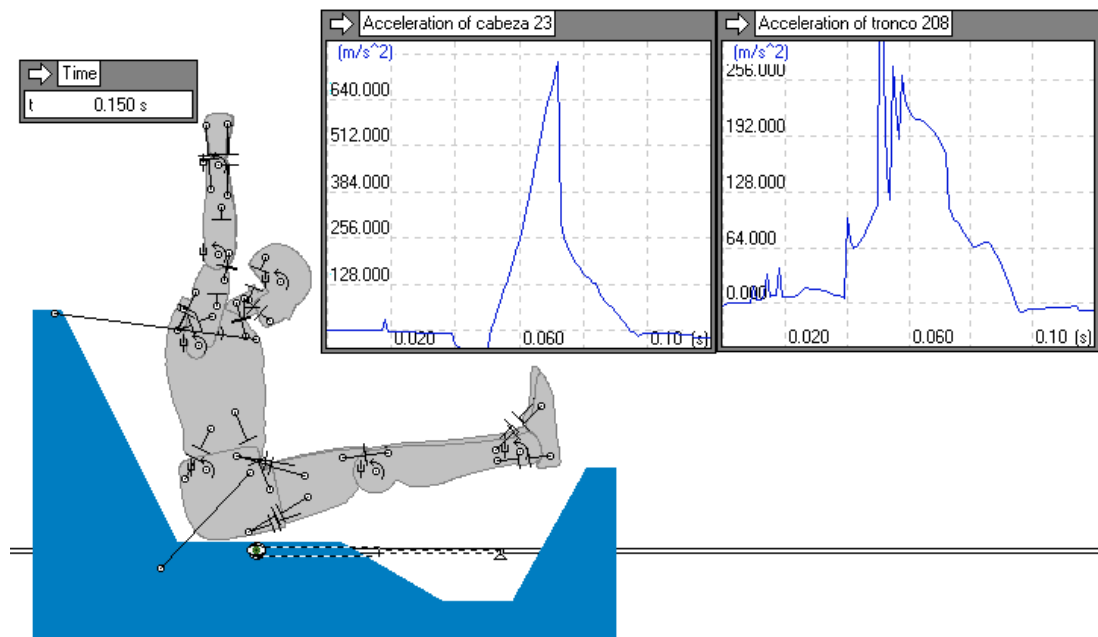


Figura 4.35 – Modelo 2 Amortiguador

4.4.1.3 MODELO 3

4.4.1.3.1 Modelo 3 Clavija

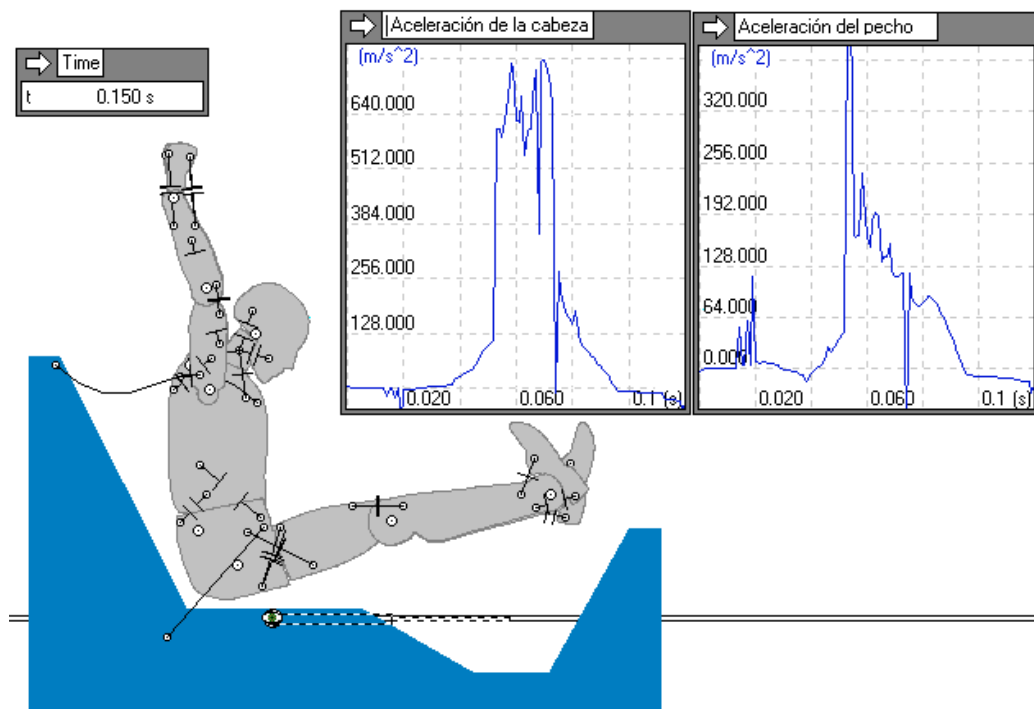


Figura 4.36 – Modelo 3 Clavija

4.4.1.3.2 Modelo 3 Muelle

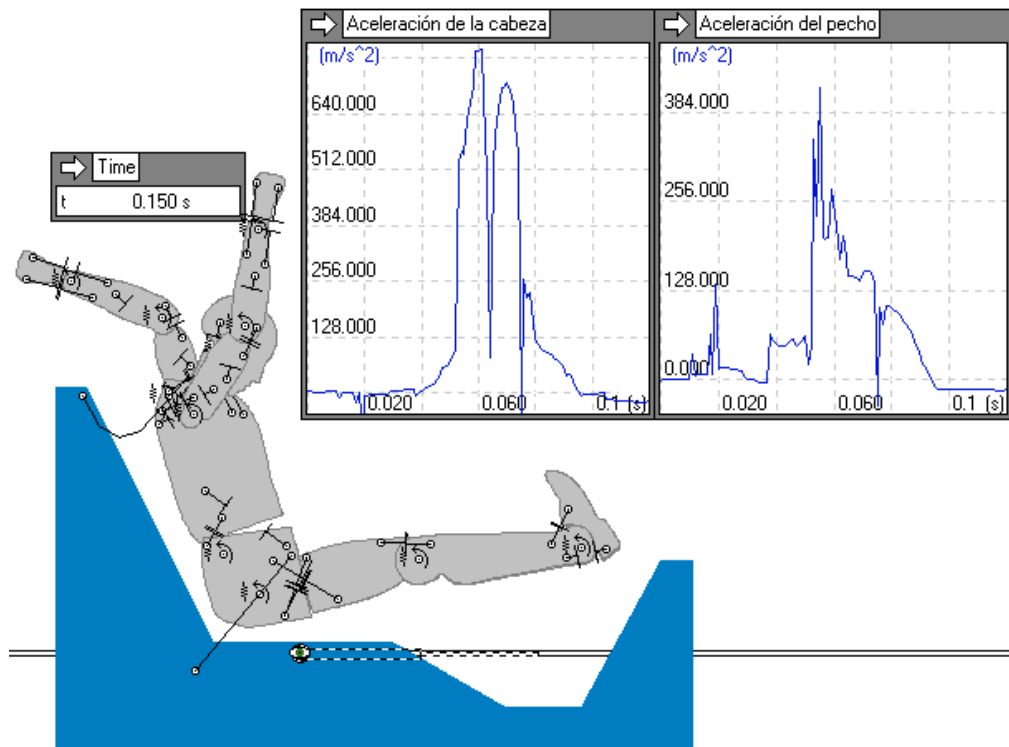


Figura 4.37 – Modelo 3 Muelle

4.4.1.3.3 Modelo 3 Amortiguador

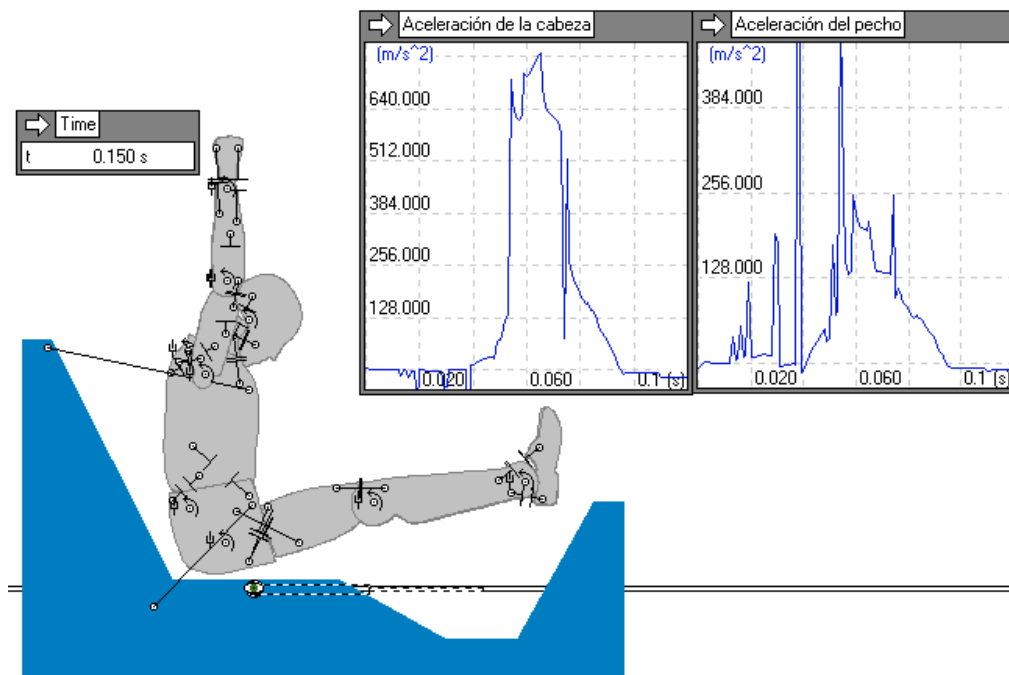


Figura 4.38 – Modelo 3 Amortiguador

En las anteriores figuras, además de poderse observar las curvas de comportamiento de los modelos, es posible apreciar las diferencias en los movimientos de los distintos dummies durante la simulación. Para ello, todas las imágenes han sido tomadas para un tiempo determinado de 150 milésimas de segundo. Como puede verse, salvo en el caso del *Modelo 3 Muelle*, los movimientos del resto de dummies presentan una gran similitud.

En las curvas que muestran el comportamiento del dummy, a través de la evolución de la aceleración longitudinal de la cabeza y del pecho, se aprecia claramente que en todas las versiones del *Modelo 3*, la aceleración de la cabeza difiere de la de otros modelos. La posible explicación a este comportamiento, puede ser la colocación en otro lugar de la articulación del cuello y cabeza. A pesar de esto, los valores pico obtenidos hacen pensar que sería posible variar el modelo, consiguiendo una mejor respuesta.

La elección del modelo que será optimizado para intentar reproducir el ensayo de referencia, está basada en las curvas que aparecen en la figura siguiente. Estas curvas corresponden con la respuesta obtenida en el ensayo realizado por ARA, con las cuales se validó el modelo de Hybrid III realizado por esta empresa.

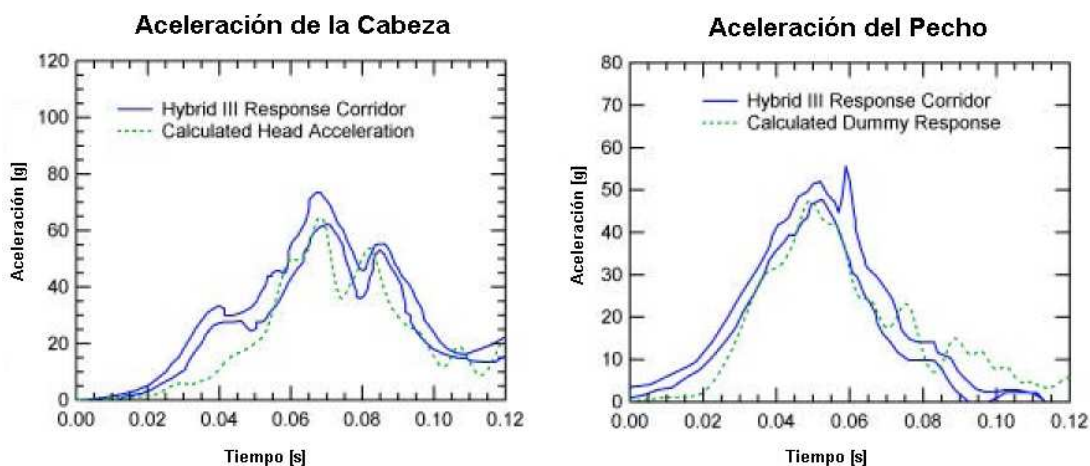


Figura 4.39 – Comportamiento del dummy durante el ensayo realizado por ARA. La curva azul corresponde con la respuesta del dummy real, mientras que la línea verde muestra la respuesta del modelo simulado.

El criterio de selección, del modelo que será optimizado, se ha basado en las dos curvas de forma independiente, en un primer momento.

En el caso de la aceleración de la cabeza, se ha buscado, sobre todo, que el valor máximo estuviese cerca de los valores de la curva de referencia. También se ha observado la forma general de la gráfica, buscando indicios que hiciesen intuir futuras mejoras con simples modificaciones.

En el caso de la curva de la aceleración del pecho, como puede verse en todos los modelos, el valor máximo conseguido no supera la aceleración equivalente a 26 g's, que corresponde con la aplicada sobre el asiento durante el ensayo. Por este motivo, el valor máximo de la curva no ha servido como criterio en elección del modelo. Sin embargo, ha sido su forma, la cualidad característica buscada, destacando aquellas que fuesen lo más similares posible a la de la curva de referencia. Las variaciones tan grandes y rápidas de la aceleración, que aparecen en todas las curvas, dificultan la apreciación de las curvas. Estas variaciones, pueden ser debidas a la tensión aplicada por los elementos de retención y por otras causas, como posibles choques o movimientos bruscos de otras partes del cuerpo.

Además de los anteriores criterios, en la elección final del modelo se valoró la mayor sencillez en las posteriores modificaciones del modelo.

Por todo esto, el modelo elegido para ser optimizado ha sido el **MODELO 2 CLAVIJA**.

A pesar de haberse elegido este modelo, como ya se ha comentado, no significa que los otros modelos, una vez modificados no puedan conseguir buenos resultados. Probablemente si se realizase una optimización de todos los modelos, los resultados podrían ser incluso mejores que los conseguidos con el modelo elegido. Pero, la elección se debía basar en una serie de condiciones, que el Modelo 2 Clavija cumple, y por este motivo ha elegido.

4.5 OPTIMIZACIÓN DE LA SIMULACIÓN

Una vez elegido el *Modelo 2 Clavija*, la siguiente fase es optimizar este modelo, con el cual conseguir el mejor resultado posible.

Durante este proceso se realizarán modificaciones en estos aspectos:

- ◆ Posición del dummy. Según se ha comprobado, una variación en la colocación del dummy en el asiento, o una modificación de su postura, produce un cambio en los valores empleados en la validación del modelo.
- ◆ Propiedades. Variando las propiedades del dummy o del asiento se pueden obtener distintas respuestas del modelo.
- ◆ Elementos de retención. Realizando modificaciones en estos elementos, se obtienen comportamientos y resultados muy dispares.

El resto de parámetros, propiedades o elementos no se variarán para evitar modificar en exceso el modelo elegido en la selección anterior. Tampoco se modificarán las ubicaciones de las articulaciones del dummy, ni tampoco el rango de sus movimientos.

4.5.1 PROCESO DE OPTIMIZACIÓN

En este apartado se indican los detalles finales elegidos en la optimización del modelo, así como los resultados finales. Posteriormente se indican los resultados obtenidos, especificando los objetivos alcanzados y las posibles limitaciones encontradas.

En el proceso llevado a cabo para mejorar el modelo elegido, a parte de tener en cuenta las consideraciones o requisitos anteriores, se ha seguido un criterio más. Durante la optimización se ha pretendido conseguir un compromiso entre el comportamiento del dummy y su dinámica, para que ambos aspectos fuesen lo más semejantes posible a los realizados por un dummy real en un ensayo de este tipo. Pero, ya que los únicos datos objetivos comparables, son los de los valores de la respuesta del dummy, indicados a través de las gráficas de aceleración, todos las

modificaciones se han llevado a cabo para conseguir las aceleraciones más cercanas a las del ensayo de referencia.

A continuación, se indican los parámetros introducidos en la simulación y que han dado como resultado el modelo final.

4.5.1.1 PARÁMETROS

El método seguido en la elección de los diferentes elementos y variables ha sido la de prueba y error. Por esto, todas las modificaciones o parámetros escogidos están justificados por el propio resultado de la simulación.

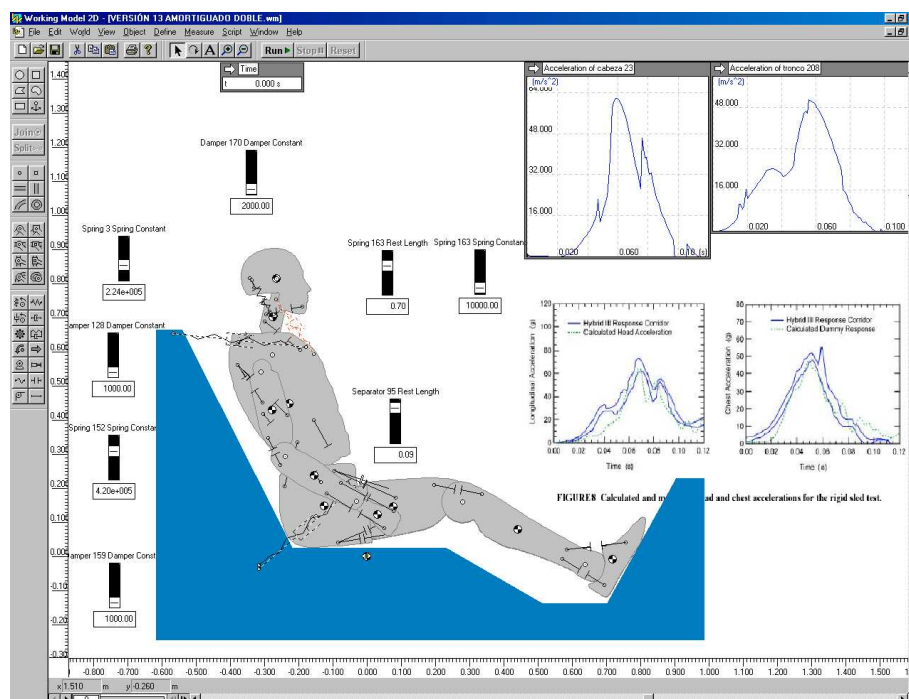


Figura 4.40 – Proceso de optimización

Valores de la precisión de la simulación

El tiempo de integración se ha mantenido en 0,001 segundos, mientras que la tolerancia se ha cambiado a 0,002 metros. Este cambio rectifica las curvas de aceleración, suavizándolas y minorando los picos que aparecen a lo largo de las gráficas.

Posicionamiento del dummy

Puesto que ha primado obtener unos valores, representados por las curvas de aceleración, cercanos a los del ensayo de referencia, el posicionamiento del dummy puede no corresponder con el del dummy en el ensayo real. La inclinación del tronco del dummy se basó en los mejores resultados obtenidos en las distintas pruebas realizadas.

Coeficientes

A pesar de haber realizado diferentes pruebas variando los coeficientes de fricción de los diferentes elementos, no se han encontrado diferencias significativas de comportamiento. Por este motivo, se han mantenido los coeficientes elegidos arbitrariamente desde un principio.

Modificaciones del dummy

Puesto que se ha elegido el Modelo 2 Clavija para realizar la optimización del ensayo, hay que evitar realizar cualquier modificación sobre él, para no variar un dummy elegido, precisamente por su comportamiento.

Las únicas modificaciones introducidas, son una serie de elementos que no pueden ser considerados como parte del propio dummy, ya que podrían ser incluidos en cualquiera de los otros modelos, si hubiesen sido elegidos. Estos elementos son, dos resortes y un amortiguador, con los cuales se induce al dummy una respuesta que sin ellos, no se consigue.

Elementos de retención

Tras muchas pruebas empleando los elementos de retención elegidos desde el principio, simulados mediante sogas o cuerdas, se observó como no se podían conseguir los resultados deseados. Por este motivo, estas sogas han sido sustituidas por resortes, con los cuales reproducir mejor el cinturón de seguridad, al permitir un frenado del cuerpo del dummy más progresivo. Además se han incluido amortiguadores con los cuales mejorar la respuesta y comportamiento del dummy.

4.5.2 RESULTADOS DEL MODELO OPTIMIZADO

Los resultados principales de la optimización del modelo quedan reflejados en las siguientes figuras. Corresponden con las gráficas que representan la evolución de la aceleración de la cabeza y del pecho, con respecto al tiempo, del modelo optimizado.

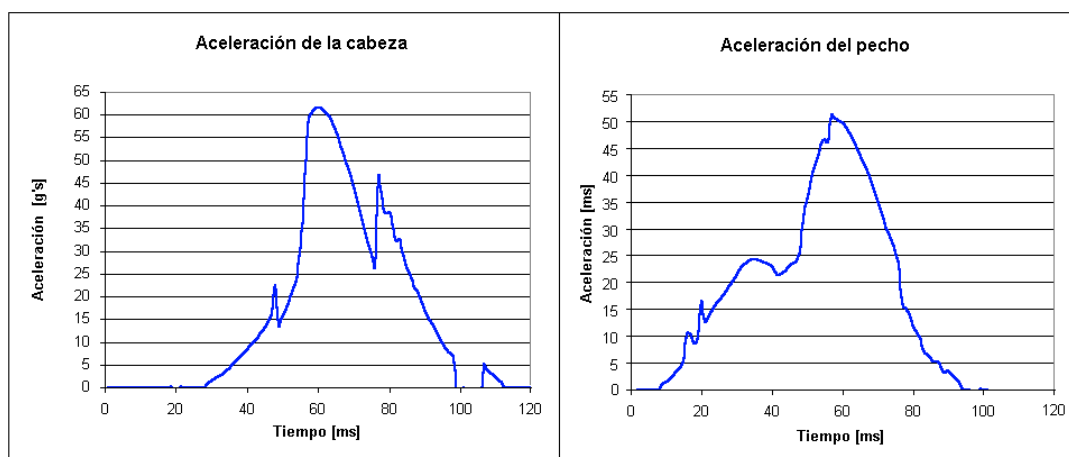


Figura 4.41 – Curvas de aceleración del modelo optimizado

Gracias a estas curvas, se puede comparar el modelo realizado en este proyecto con el ensayo de referencia desarrollado por ARA, y de esta forma, poder evaluar la validez del modelo simulado con Working Model 2D.

Los movimientos del dummy durante el ensayo pueden verse en la secuencia de imágenes incluidas en la siguiente figura.

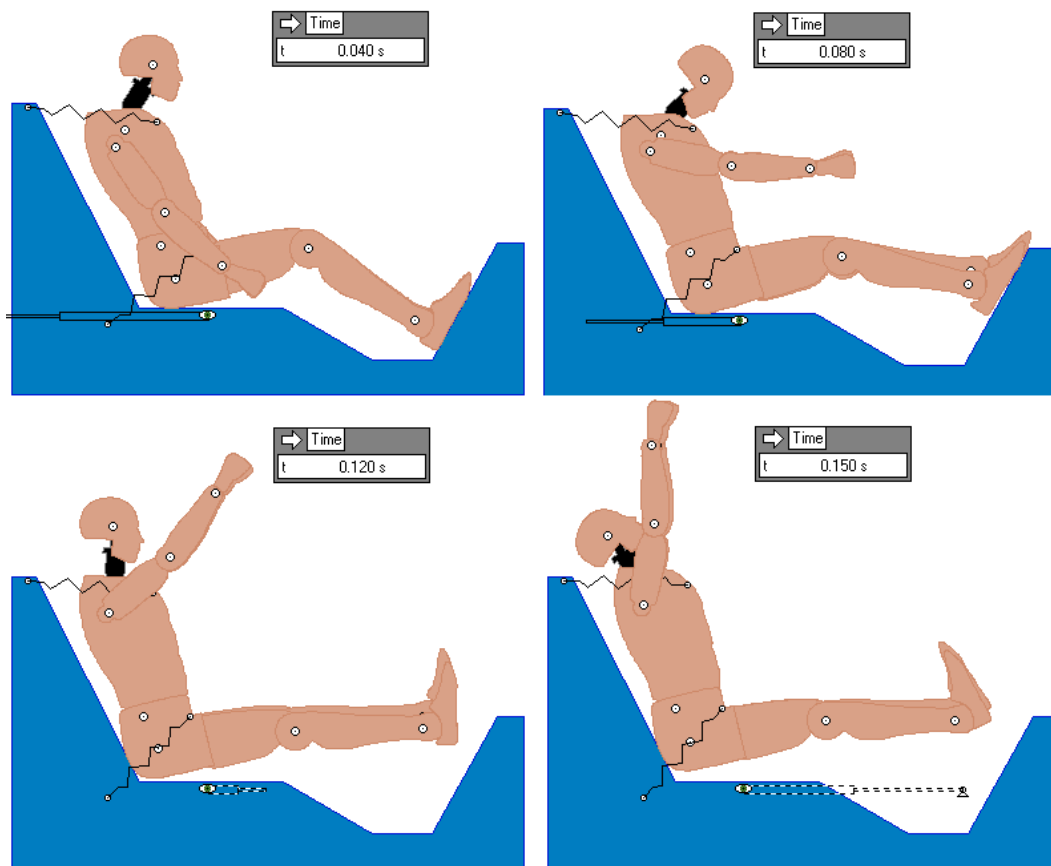


Figura 4.42 – Secuencia del ensayo con el modelo optimizado

4.5.3 VALIDACIÓN DEL MODELO

Para validar el modelo final, se han comparado los resultados del modelo optimizado realizado con WM2D y el ensayo realizado por ARA. En la figura siguiente aparecen las distintas gráficas superpuestas. Las curvas representadas en color rojo, son las conseguidas con el modelo optimizado, mientras que las de color verde corresponden con el modelo realizado por Applied Research Associates. Las líneas en color azul, corresponden con las respuestas conseguidas durante el ensayo real.

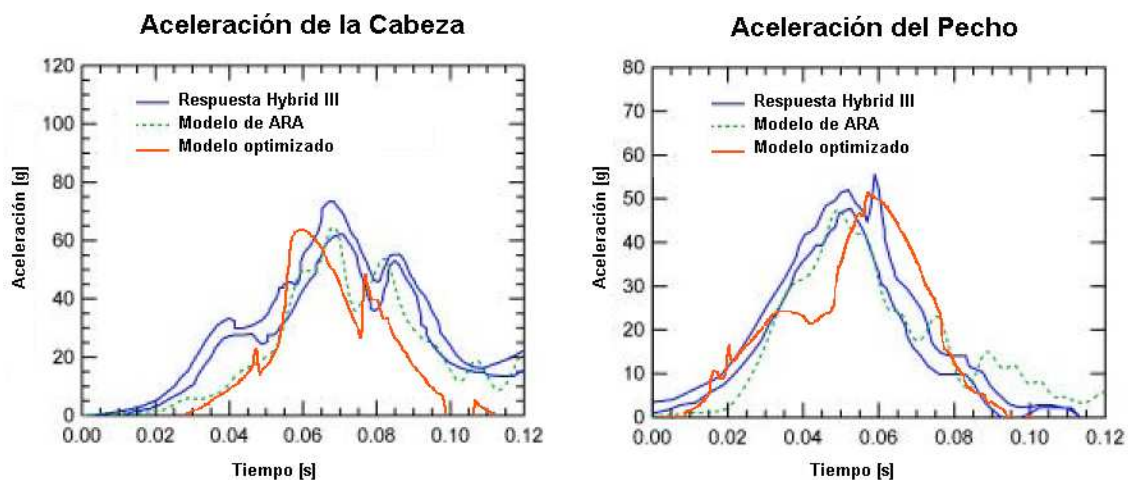


Figura 4.43 – Comparación de la respuesta obtenida con el modelo optimizado, con las respuestas del Hybrid III real y el modelo de ARA

Prestando atención a la figura superior, se puede ver como el modelo optimizado tiene una respuesta cercana a las respuestas tanto del dummy real, como la del otro modelo, aunque existen algunas diferencias puntuales.

Con la curva de la aceleración de la cabeza del ensayo ARA, existe un error máximo del 12%, aproximadamente, en los tiempos en los que se consiguen los valores máximos, que a la vez son los datos más importantes que se extraen de este tipo de ensayos. Estos valores se diferencian aproximadamente en un 10%. Además, en la zona de la gráfica inicial, donde comienza a aumentar el valor de la aceleración, se pueden comentar dos aspectos fundamentalmente. En primer lugar, la aceleración comienza a subir más tarde que en las otras curvas, aunque tiene una gran semejanza a la curva del modelo de ARA. El otro punto a destacar es la mayor pendiente que experimenta la curva hasta alcanzar el valor máximo. Por otro lado, en la parte final de la gráfica se observa como la aceleración disminuye más rápidamente que en los otros casos.

A pesar de esto, los valores de aceleración, aunque aparecen en tiempos ligeramente inferiores, son muy similares a los de los otros ensayos, tanto el real como la simulación de ARA.

En la siguiente figura se señalan los aspectos mencionados, en los que el modelo optimizado difiere de los otros.

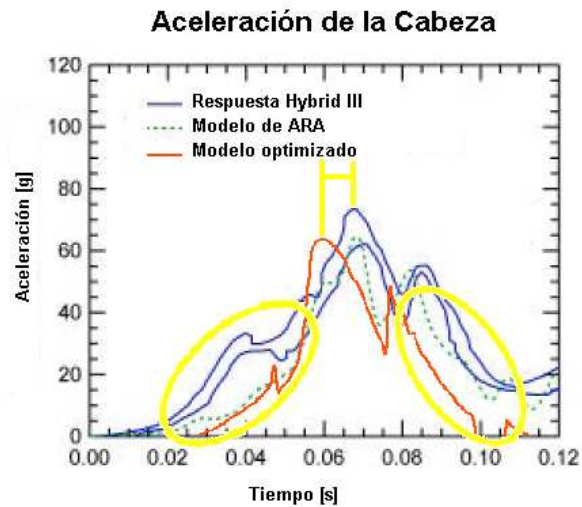


Figura 4.44 – Indicación de los aspectos diferentes en la aceleración de la cabeza del modelo optimizado

En la curva de aceleración del pecho, se observan dos detalles muy claramente. El primero, es esa clara evidencia que muestra un cambio en la pendiente de la curva, en su zona creciente, antes del pico de máximo valor. El segundo detalle, es la gran similitud con las otras gráficas, que presentaría la curva si no existiese esa zona en la que aparece el claro cambio de tendencia.

La figura siguiente muestra estos dos aspectos mencionados, referentes a la gráfica de la aceleración del pecho.

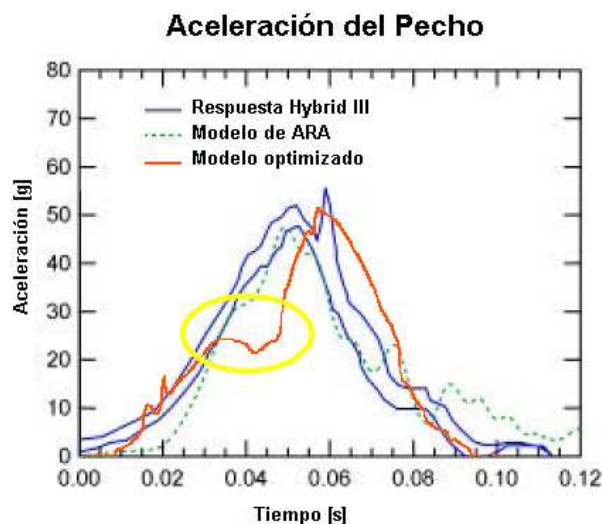


Figura 4.45 - Indicación de los aspectos diferentes en la aceleración del pecho del modelo optimizado

Las diferencias entre los dos modelos comparados se pueden atribuir a diferentes causas:

- ♦ La metodología empleada en la construcción del dummy, obligó a introducir diversas simplificaciones, que probablemente hayan hecho que el modelo final se aleje del comportamiento de los modelos de referencia. Una de estas simplificaciones, que han producido diferencias en el comportamiento del modelo, han sido la sustitución de los elementos elásticos, que constituían el cuello y la espina lumbar, por elementos rígidos. En el caso de la curva de la aceleración del pecho, como se ha comentado, existe un claro cambio de tendencia en la gráfica, que está directamente relacionado con el movimiento de la cabeza.
- ♦ Otra simplificación introducida en el modelo ha sido la del pulso de aceleración, con el cual se ha producido el movimiento del conjunto. Aunque posee una gran similitud con el pulso de aceleración original, se trata de una nueva simplificación introducida, que implica diferencias con el ensayo de referencia.
- ♦ Aunque la principal causa puede ser debido a que, el programa empleado, Working Model 2D, presenta algunas características que han limitado en algunos momentos las posibles mejoras de los modelos.

5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

5.1 CONCLUSIONES

A continuación se presentan las conclusiones más importantes que se pueden extraer de la finalización del presente proyecto:

- ◆ Se ha realizado una revisión de algunos de los sistemas que existen actualmente para aumentar la seguridad del automóvil, con especial atención en los sistemas de seguridad pasiva.
- ◆ Se han revisado los ensayos de choque de vehículos que se realizan hoy en día por diferentes entidades, para garantizar unas condiciones mínimas de seguridad en los vehículos, así como los diferentes modelos de dummies que se utilizan en los mismos.
- ◆ Se han realizado nueve modelos diferentes de dummies y con ellos se han simulado el ensayo realizado por ARA (Applied Research Associates Inc). Después de estudiar el comportamiento de los modelos, se ha elegido uno de ellos y se ha procedido a su optimización.
- ◆ Para validar el modelo optimizado se han comparado los resultados obtenidos en la simulación con los resultados reales ofrecidos por ARA. Entre los dos modelos existen diferencias (del 12 % en el desfase de tiempos y del 10% en los valores de aceleración de la cabeza; del 16 % en el desfase de tiempos y del 8% en los valores de aceleración del pecho) atribuibles principalmente a las simplificaciones impuestas por las características del software utilizado.
- ◆ Se han resaltado las características y ventajas de la utilización de las nuevas tecnologías en la enseñanza, con las cuales conseguir una docencia más completa y acorde con la sociedad actual.

En resumen, se puede concluir que el programa de simulación en dos dimensiones, Working Model 2D, es válido para la realización de simulaciones de ensayo de choque de vehículos, lo que permite simplificar el proceso de simulación que actualmente se hace con programas más complicados y costosos.

5.2 TRABAJOS FUTUROS

El modelo optimizado se ajusta bastante bien a la realidad, pero a partir de él se pueden introducir algunas mejoras que darán lugar a otras líneas de trabajo:

- ◆ Refinado del aspecto y geometría del dummy.
- ◆ Modificación de los puntos de articulación en los elementos elásticos, que han sido modelados con cuerpos rígidos, con los cuales conseguir mejores comportamientos.
- ◆ Optimización del mismo modelo elegido, o de otro, modificando los elementos empleados, o empleando un proceso distinto, con los cuales conseguir mejores resultados.
- ◆ Desarrollo de un ensayo con aceleración variable. Es decir, poder reproducir diferentes condiciones como son frenadas bruscas o colisiones a diferentes velocidades. Antes de realizar este desarrollo, hay que tener en cuenta que no se conoce si el comportamiento del dummy es proporcionalmente lineal a la aceleración aplicada, ya que la optimización del modelo realizada ha sido basada únicamente teniendo en cuenta los datos facilitados por ARA. Por tanto, sería necesario una búsqueda bibliográfica con la cual conocer el comportamiento de los dummies ante diversas aceleraciones.
- ◆ La línea de trabajo más ambiciosa, sería reproducir un ensayo de choque frontal completo, incluyendo el vehículo, de forma que la aceleración aplicada sería resultado del propio proceso de frenado del vehículo. Para esto sería necesario una mayor búsqueda bibliográfica donde encontrar la aceleración detallada sufrida por un vehículo durante un crash test. Además, se debería conocer como se modifica el comportamiento del dummy ante diferentes aceleraciones.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1]. www.uib.es/depart/gte/revelec1.html . Revista Electrónica de Tecnología Educativa. Nº 1, Febrero 1996.(Última consulta, Junio 2005)
- [2]. Folleto para el Día Mundial de la Salud, 7 de abril de 2004."La Seguridad Vial No Es Accidental". Organización Mundial de la Salud (O.M.S.)
- [3]. www.dgt.es . Dirección General de Tráfico (D.G.T.). (Última consulta, Enero 2005)
- [4]. www.race.es . Real Automóvil Club de España (R.A.C.E.). (Última consulta, Noviembre 2004)
- [5]. "Frenando con ABS". Instituto de Investigación sobre Reparación de Vehículos – Centro Zaragoza. (2001)
- [6]. www.pacocostas.com . Web del periodista Paco Costas. (Última consulta, Diciembre 2004)
- [7]. www.robert-bosch-espana.es . Bosch. (Última consulta, Diciembre 2004)
- [8]. "La Eficacia del Cinturón de Seguridad". Instituto de Investigación sobre Reparación de Vehículos – Centro Zaragoza. (1998)
- [9]. "Dossier Cinturón de Seguridad. Abrocharse a la Vida". Revista tráfico. (Septiembre-Octubre 1999)
- [10]. "SARTRE3. Proyecto Europeo sobre Actitudes y Conductas frente al Riesgo Vial". (2005)
- [11]. "Airbag". Instituto de Investigación sobre Reparación de Vehículos – Centro Zaragoza. (1998)
- [12]. "Un Instante Para Sobrevivir". Revista tráfico. (Noviembre-Diciembre 2000)
- [13]. "Dossier Estructura. El Esqueleto Que Nos Protege". Revista tráfico. (Septiembre-Octubre 2000)
- [14]. "El Habitáculo de Seguridad". Instituto de Investigación sobre Reparación de Vehículos – Centro Zaragoza. (2000)
- [15]. www.inta.es . Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (I.N.T.A.). (Última consulta, Febrero 2005)
- [16]. "Homologar la Seguridad". Juan M. Menéndez. Revista tráfico (Mayo-Junio 2000)
- [17]. www.euroncap.com . European New Car Assessment Programme (EuroNCAP). (Última consulta, Diciembre 2005)

- [18]. Directiva 96/79/CE del Parlamento Europeo. (1996)
- [19]. Directiva 96/27/CE del Parlamento Europeo. (1996)
- [20]. “Análisis del Comportamiento del Cuerpo Humano en Colisiones”. M^a Belén Muñoz Abella. Universidad Carlos III de Madrid - Área de Ingeniería Mecánica. (2004)
- [21]. “Resistencia del Cuerpo Humano a Impactos y Deceleraciones”. José Luis San Román García. Universidad Carlos III de Madrid - Área de Ingeniería Mecánica. (2004)
- [22]. “Maniquíes Casi Humanos”. Revista tráfico. (Septiembre-Octubre 1998)
- [23]. www.ftss.com . Fisrt Technology Safety Systems (F.T.S.S.). (Última consulta, Noviembre 2004)
- [24]. http://en.wikipedia.org/wiki/Crash_test_dummy . Wikipedia, La Enciclopedia Libre. (Última consulta, Diciembre 2004)
- [25]. www.gm.com . General Motors. (Última consulta, Diciembre 2004)
- [26]. www.dentonatd.com . Denton ATD. (Última consulta, Marzo 2005)
- [27]. www.hwysafety.org . Insurance Institute For Highway Safety. (Última consulta, Marzo 2005)
- [28]. www.cidaut.es . CIDAUT. Fundación para la Investigación y Desarrollo en Transporte y Energía. (Última consulta, Abril 2005)
- [29]. www.ara.com . Applied Research Associates Inc. (ARA). (Última consulta, Enero 2005)
- [30]. www.esi-group.com . Esi Group. (Última consulta, Enero 2005)
- [31]. www.automotive.tno.nl . TNO Automotive. (Última consulta, Diciembre 2004)
- [32]. www.nrd.nhtsa.dot.gov/departments/nrd-51/THORAdv/THORAdv.htm . National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA). (Última consulta, Junio 2005)
- [33]. Código de Regulaciones Federales de Estados Unidos, Parte 572, Subparte E
- [34]. “Biomecánica fuera y dentro del laboratorio”. Xavier Aguado Jódar. Universidad de León. (1997)
- [35]. “Cuadernos de fisiología articular” (Vol. I, II, III). I.A. Kapandji. Ed. Masson. (1996)
- [36]. www.faa.gov . Federal Aviation Administration (FAA). (Última consulta, Diciembre 2004)
- [37]. www.deutsches-museum-bonn.de . Deutsches Museum Bonn. (Última consulta, Febrero 2005)